

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil



THÈSE DE DOCTORAT

Option: Matériaux

Présentée par

Rebih ZAITRI

Thème

EFFET DE L'AJOUT DE CALCAIRE ET DE SABLE DE DUNE
BROYÉS SUR LE COMPORTEMENT PHYSICO-MÉCANIQUE
ET SUR LA DURABILITÉ DES BÉTONS À HAUTES
PERFORMANCES

Soutenue le 02 / 06 / 2016 devant le jury composé de

M. Mohamed Mouldi KHENFER	Professeur, Université de Laghouat	Président
M. Salim GUETTALA	MCA, Université de Djelfa	Examineur
M. Brahim SAFI	MCA, Université de Boumerdes	Examineur
M. Akram Salah Eddine BELAIDI	MCA, Université de Laghouat	Examineur
M. Madani BEDERINA	Professeur, Université de Laghouat	Directeur de thèse
M. Zoubir MAKHLOUFI	MCA, Université de Laghouat	Co-Directeur de thèse

Année universitaire : 2015/2016

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace



Je dédie cet humble travail à :

La mémoire de ma mère

Mon père qui m'a soutenu et encouragé durant toute ma scolarité,

Ma chère femme, mes chers enfants :

Fatima Zahra, Imane, Ibtissam, Rokaya et Younes Abdelaziz.

Toute ma famille,

Mes professeurs,

Ainsi que tous mes amis.

ZAITRI REBIH

REMERCIEMENTS :

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse se sont déroulés au laboratoire de département de génie civil à l'université de Laghouat. Mes remerciements s'adressent tout d'abord à la direction de cet établissement pour avoir mis à ma disposition les moyens nécessaires au bon déroulement de cette thèse.

Je tiens à remercier chaleureusement mon encadreur Mr Madani BEDERINA professeur à l'université de Laghouat et mon co-encadreur Mr Zoubir MAKHLOUFI, maître de conférences à l'université de Laghouat pour leurs conseils éclairés, leurs soutiens durant la rédaction ainsi que tout le temps qu'ils m'ont apprécié de ses constantes disponibilités.

Je remercie tout particulièrement Mr Mohamed Mouldi KHENFER, professeur à l'université de Laghouat, de m'avoir présidé le jury de ma soutenance.

Mes remerciements vont également à Mr Brahim SAFI, maître de conférences à l'université de Boumerdes et Mr Salim GUETTALA, maître de conférences à l'université de Djelfa et Mr Akram Salah BELAIDI, maître de conférences à l'université de Laghouat qui m'ont fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier vivement Mr Tayeb BOUZIANI et Mr Mourad HADJOUJA qui ont toujours été disponibles et m'ont permis également de connaître le monde magique du plan d'expériences.

Mes remerciements vont à ceux qui, de près ou de loin ont apporté leur aide. Je pense bien évidemment à tous mes collègues du département de génie civil à l'université de Djelfa et plus particulièrement ceux qui se sont montrés disponibles jusqu'au dernier moment. Et je ne peux oublier mon cousin Messaoud ZAITRI qui m'a apporté son aide et soutien.

Les remerciements ne seraient être complets sans remercier Mm Souad BEN ARRACHE, Doctorante et responsable du laboratoire de DRX à l'université de Laghouat, je lui adresse tout mon respect pour sa gentillesse et son aide précieuse.

Je terminerai par remercier ma famille et en particulier mon père qui m'a soutenu durant mes études et qui m'a toujours encouragé.

Finalement, la reconnaissance la plus sincère s'adresse à mon épouse, qui m'a épaulé moralement.

RÉSUMÉ :

Cette étude présente les résultats d'un programme expérimental dans lequel l'approche des plans d'expériences a été utilisée afin d'optimiser des BHP formulés à base de matériaux locaux de la région de Laghouat (Algérie). Les matériaux locaux valorisés sont des additions minérales, calcaires et siliceuses, obtenus respectivement par tamisage de déchets de concassage et par broyage fin de sables de dunes. Les deux additions sont ajoutées par substitution partielle au ciment.

Un plan de mélange à 3 facteurs a été utilisé afin de modéliser l'influence du dosage en ciment ainsi que des dosages de ces deux additions sur les propriétés d'un béton à haute performance. Grâce à un logiciel d'analyse statistique JMP7, des modèles mathématiques expliquant au mieux les résultats d'essais, en particulier la maniabilité et les propriétés mécaniques, ont été déterminés et développés dans ce travail. Ces modèles mathématiques ainsi obtenus permettent en fait la prédiction de l'effet de chacun des facteurs étudiés, séparément et en combinaison, sur les propriétés des BHP.

Les résultats trouvés montrent que, globalement, l'introduction de l'addition calcaire (Fillers calcaires (FC)) et de l'addition siliceuse (Sable de dune broyé (SDB)) dans le ciment (en substitution) joue un rôle bénéfique en améliorant les résistances mécaniques à moyen et long terme. Il a été montré notamment que la résistance mécanique augmente avec le pourcentage d'additions jusqu'à un optimum (5% de SDB et 5% de FC) puis diminue pour des pourcentages plus élevés. Les résultats trouvés montrent aussi qu'il est possible d'obtenir des bétons à hautes performances de bonne ouvrabilité grâce à l'ajout des fines calcaires et de fines siliceuses.

Par ailleurs, des essais de durabilité consistant à suivre le comportement à long terme de certaines compositions du béton étudié, dans des milieux plus ou moins agressifs en procédant par des cycles 'immersion /séchage' ont été réalisés. Ces essais servent à étudier l'effet des additions minérales (SDB, FC) sur la résistance aux attaques chimiques des BHP et à essayer ainsi d'apporter une contribution à la compréhension des principaux mécanismes d'action de ces additions incorporées dans les BHP, en particulier vis-à-vis des attaques acides et sulfatiques.

L'analyse des résultats des essais de la durabilité des bétons étudiés vis-à-vis des sulfates de magnésium et de l'acide chlorhydrique) montre clairement que l'incorporation du SDB et du FC contribue d'une manière positive à la durabilité des BHP en comparaison avec le BHP de contrôle. Ceci est dû à la formation des C-S-H supplémentaires issus de la réaction pouzzolanique d'une part et d'autre part à la dilution des aluminates et la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compacts.

En effet, le faible rapport E/C et la substitution d'une partie de ciment par l'ajout de SDB et de FC, ont conduit aussi à la protection des bétons élaborés, contre les agressions chimiques, en réduisant leur porosité, ce qui rend difficile la pénétration des éléments agressifs dans les pores interstitiels des bétons.

Il faut noter enfin noter que, même après 180 jours de conservation dans les milieux agressifs, les caractéristiques mécaniques de ces bétons ne sont pas affectées par les dégradations.

Mots clés : Béton à haute performance, sable de dunes, fillers calcaires, fillers siliceux, valorisation, recyclage, broyage, plans d'expériences, propriétés physico-mécaniques, durabilité, agressions chimiques.

ABSTRACT :

This study presents the results of an experimental program in which the approach of the plans of experiments was used to optimize a high performance concrete (HPC) which is formulated with local materials of the region of Laghouat (Algeria). Those valorised local materials are mineral additions, siliceous and limestones, obtained respectively by fine grinding of dunes sands and sieving aggregate crushing. Both additives (siliceous, limestones) are introduced in the cement as partial substitution.

A mixture of 3-factor design was used to model the influence of the cement content and dosages of these two additions on the properties of the studied high-performance concrete. Through a JMP7 data-analysis program, mathematical models explaining the best test results, particularly the workability and mechanical properties have been determined and developed in this work. In fact, these mathematical models allow the prediction of the effect of each of the examined factors, either separately and in combination, on HPC properties.

Generally, the results show that the introduction of limestone addition (limestone fillers (LF)) and siliceous addition (sand dune ground (SGD)) in cement (by substitution) plays a beneficial role in improving medium and long-term strengths. It has been shown in particular that the mechanical strength increases a long with the percentage of additions until an optimum (5% SGD and 5% LF) and then decreases for higher percentages. The results also show that it is possible to obtain high performance concretes with good workability due to fine limestone and silica additions.

In addition, sustainability of the long-term behavior tests of some of the studied concrete compositions were carried in different conditions through dumping and drying processes. These tests aims to study the effect of mineral additions (SGD, LF) on the chemical resistance of HPC and contribute to understanding the main mechanisms of action of these additions incorporated into HPC, in particular with respect to acidic and sulphatic attacks.

The study has shown that the incorporation of SGD and LF contributes in a positive way to the sustainability of HPC. Indeed, they offer better resistance to acids and sulfates in comparison with HPC control.

Keywords: high performance concrete, sand grinding dunes, limestone fillers, silica fillers, recovery, recycling, crushing, design of experiments, physico-mechanical properties, durability, chemical attack.

ملخص :

هذه الدراسة تقدم نتائج برنامج تجريبي استخدمت فيه مقارنة تصميم التجارب بغية صياغة الخرسانة عالية الأداء المثالية باستخدام مواد محلية من منطقة الأغواط (الجزائر). المواد المحلية المثلثة هي إضافات معدنية كلسية و صوانية متحصل عليها على التوالي من غربلة بقايا السحق و من سحق رمل الكثبان. يتم إضافة هذين المادتين بنسبة الاستبدال الجزئي إلى الأسمنت.

تصميم المزيج لـ 3 عوامل تم استعماله لنمذجة تأثير محتوى الاسمنت و كذلك محتوى الإضافتين على خصائص الخرسانة عالية الأداء. بفضل برنامج التحليل الإحصائي JMP7 ، نماذج رياضية تم تحديدها لتشرح لنا أفضل نتائج الاختبار، بالخصوص قابلية التشكيل والخواص الميكانيكية. هذه النماذج الرياضية التي تم الحصول عليها تسمح لنا واقعا بالتنبؤ بتأثير كل من العوامل المدروسة بشكل منفصل و بشكل مجمع على خصائص الخرسانة عالية الأداء.

النتائج المتحصل عليها تبين عموما أن إضافة الكلس (نواعم كلسية (FC)) و نواعم صوانية (مسحوق رمل الكثبان (SDB)) إلى الإسمنت (عن طريق الاستبدال) يلعب دورا هاما في تحسين القوة الميكانيكية المتوسطة والطويلة الأمد. فقد تبين على وجه الخصوص أن القوة الميكانيكية تتزايد مع نسبة الإضافات حتى النسبة المثالية (5% مسحوق رمل الكثبان و 5% كلس) ثم تتخفف بنسب أعلى. النتائج المتحصل عليها تبين أيضا أنه من الممكن الحصول على خرسانة عالية الأداء ذات قابلية تشكيل جيدة بفضل إضافة النواعم الكلسية و الصوانية.

من جهة أخرى، أجريت تجارب الديمومة لمتابعة سلوك بعض تراكيب الخرسانة المدروسة على المدى الطويل، في أوساط أكثر أو أقل عدوانية بإتباع دورات غمر/ تجفيف. هذه التجارب تستخدم لدراسة تأثير الإضافات المعدنية (مسحوق رمل الكثبان SDB ، الكلس FC) على المقاومة الكيميائية للخرسانة عالية الأداء ومحاولة الإسهام في فهم الآليات الأساسية لعمل هذه الإضافات المدموجة في الخرسانة عالية الأداء ، خاصة في وجه الهجمات الحمضية و الكبريتية.

وقد أظهرت الدراسة أن إضافة مسحوق رمل الكثبان SDB والكلس FC يساهم بطريقة إيجابية على ديمومة الخرسانة عالية الأداء. و يوفر مقاومة أفضل للأوساط الحمضية والكبريتية بالمقارنة مع الخرسانة عالية الأداء المرجعية.

الكلمات مفاتيح: الخرسانة عالية الأداء، الكثبان الرملية، نواعم كلسية، نواعم صوانية، تميمين، إعادة التدوير، سحق ، طريقة تصميم التجارب، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، الديمومة، الهجمات الكيميائية.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	iv
ملخص	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I : Rappels théoriques et synthèses bibliographiques	5
I.1. HISTORIQUE	6
I.2. DÉVELOPPEMENT HISTORIQUE	6
I.3. CLASSIFICATIONS DES BÉTONS	7
I.4. DÉFINITION DES BÉTONS Á HAUTES PERFORMANCES	7
I.4.1. DIFFÉRENTES CLASSES DE BÉTONS Á HAUTES PERFORMANCES	8
I.4.2. DIFFÉRENCE ENTRE LE BHP ET LE BÉTON ORDINAIRE	8
I.5. TYPE ET CLASSIFICATION DES BHP	12
I.5.1. BHP LÉGERS	12
I.5.2. BHP LOURDS	12
I.5.3. BHP RENFORCÉS DE FIBRES	13
I.5.4. BHP COMPACTÉ AU ROULEAU	13
I.5.5. BHP Á AIR ENTRAÎNÉ	14
I.5.6. BHP CONFINÉS	14
I.6. LES AVANTAGES DES BHP	14
I.7. CONSTITUANTS DES BÉTONS Á HAUTES PERFORMANCES	15
I.7.1. CIMENT	15
I.7.2. GRANULATS	16
I.7.2.1. SABLES	16
I.7.2.2. GRAVILLONS	17
I.7.3. L'EAU DE GÂCHAGE	17
I.7.4. ADDITIONS MINÉRALES	18
I.7.4.1. FUMÉE DE SILICE	18
I.7.4.2. LAITIER DE HAUT FOURNEAU	20
I.7.4.3. CENDRES VOLANTES	21
I.7.4.4. POUZZOLANE NATURELLE	21
I.7.4.5. LES FILLERS	22
I.7.4.6. LA POUSSIÈRE	24
I.7.5. SUPERPLASTIFIANT	24
I.7.5.1. MÉCANISME D'ACTION	24
I.7.5.2. INFLUENCE DU DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT ET LE MODE D'INCORPORATION	25
I.8. CARACTÉRISATION DES BÉTONS Á HAUTES PERFORMANCES	26
I.8.1. CARACTÉRISTIQUES RHÉOLOGIQUES DES BHP	26
I.8.2. CARACTÉRISTIQUES DES BHP Á L'ETAT DURCI	27
I.8.2.1. RÉSISTANCE EN COMPRESSION	27

I.8.2.2. RÉSISTANCE EN TRACTION	28
I.8.2.3. POROSITÉ	28
I.8.2.4. PERMÉABILITÉ	29
I.8.2.5. MODULE D'ÉLASTICITÉ (EN COMPRESSION)	30
I.8.2.6. RÉSISTANCE AU FEU	31
I.8.2.7. RETRAIT ET FLUAGE	31
I.8.2.8. DURABILITÉ	32
I.8.2.8.1. FACTEURS AFFECTANT LA DURABILITÉ DU BÉTON	34
I.8.2.8.2. PHÉNOMÈNES INFLUENTS SUR LA DURABILITÉ	34
I.9. FORMULATION DES BÉTONS Á HAUTES PERFORMANCES	35
I.9.1. MÉTHODE DE FORMULATION DE L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE	36
I.9.2. AUTRES MÉTHODES DE FORMULATION	39
I.9.2.1. MÉTHODE SUGGÉRÉ PAR LA COMITÉ ACI 363	39
I.9.2.2. MÉTHODE DES COULIS DU LCPC	40
I.9.2.3. MÉTHODE SIMPLIFIÉE DE MEHTA ET AÛTCIN	40
I.10. MICOSTRUCTURE DES BHP	40
I.10.1. CONSTITUTION	40
I.10.2. PEAU DU BÉTON	41
I.10.3. INTERFACE PÂTE-GRANULATS	41
I.11. APPLICATIONS DES BHP	42
I.11.1. LES PONTS	42
I.11.2. LES BÂTIMENTS	43
I.11.3. LES TUNNELS	44
I.11.4. LES PLATES-FORMES PÉTROLIÈRES	45
I.12. CONCLUSION	45
CHAPITRE II : Caractérisation des matériaux utilisés et techniques expérimentales	46
II.1. INTRODUCTION	47
II.2. MATIÈRES PREMIÈRES	47
II.2.1. CIMENT	47
II.2.2. AJOUTS UTILISES	48
II.2.2.1. FINES SILICEUSES (SDB)	48
II.2.2.2. FINES CALCAIRES (FC)	49
II.2.3. SABLES	50
II.2.4. GRAVIERS	52
II.2.5. ADJUVANT	52
II.2.6. EAU	53
II.3. MÉTHODES D'ESSAIS	53
II.3.1. LA MÉTHODE DE PLAN D'EXPÉRIENCE	53
II.3.2. ESSAIS RÉALISÉS	54
II.3.2.1. RÉALISATIONS DES GÂCHÉES	54
II.3.2.2. MANIABILITÉ	54
II.3.2.3. CONFECTION DES ÉPROUVETTES	55
II.3.2.4. MODE DE CURE	55
II.3.2.4.1. SOLUTION DE L'EAU DOUCE	55
II.3.2.4.2. SOLUTION A LA CHAUX	56
II.3.2.4.3. SOLUTION DE MgSO ₄	56

II.3.2.4.4. SOLUTION DE HCl	56
II.3.2.5. LES ESSAIS DE RÉSISTANCES	56
II.3.2.6. LES ESSAIS DE DURABILITÉ	57
II.3.2.6.1. SUIVI DE LA RÉSISTANCE MÉCANIQUE	57
II.3.2.6.2. SUIVI DE VARIATION DE LA MASSE	57
II.3.2.6.3. SUIVI DE CHANGEMENT DE LONGUEUR	58
II.3.2.6.4. ANALYSE VISUELLE ET PAR DRX	58
II.3.2.6.5. CYCLE IMMERSION-SÉCHAGE	59
II.4. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	60
II.5. CONCLUSION	61
CHAPITRE III : Optimisation de la formulation du BHP par une modélisation " plan de mélange"	62
III.1. INTRODUCTION	63
III.2. LES PLANS D'EXPERIENCES	63
III.3. FORMULATION DE LA COMPOSITION DE BASE	64
III.4. EXPLOITATION DES RESULTATS DU PLAN DE MELANGE	68
III.4.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION	70
III.4.2. RESISTANCE A LA FLEXION	72
III.4.3. MODILISATION DE L'AFFAISSEMENT	73
III.5. CONCLUSION	75
CHAPITRE IV : Durabilité des BHP vis-à-vis des milieux agressifs	76
IV.1. INTRODUCTION	77
IV.2. RÉSULTATS ET COMMENTAIRES	77
IV.2.1. VARIATION DE MASSE	78
IV.2.1.1 ACTION DE L'EAU SATURÉE EN CHAUX	78
IV.2.1.2. ACTION DE SULFATE DE MAGNÉSIUM « MgSO ₄ »	78
IV.2.1.3. ACTION DE L'ACIDE CHLORHYDRIQUE	80
IV.2.2. RÉSISTANCE MÉCANIQUE	82
IV.2.2.1. ACTION DE L'EAU SATURÉE EN CHAUX	82
IV.2.2.2. ACTION DE SULFATE DE MAGNÉSIUM « MgSO ₄ »	83
IV.2.2.3. ACTION DE L'ACIDE CHLORHYDRIQUE	86
IV.2.3. VARIATION DE LONGUEUR	87
IV.2.4. COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTES ATTAQUES	89
IV.2.5. L'EXAMEN VISUEL	91
IV.2.6. ANALYSE PAR DRX	92
IV.2.6.1. CARACTÉRISATION PAR DIFFRACTION X DES BHP CONSERVÉS DANS L'EAU SATURÉE EN CHAUX	92
IV.2.6.2. CARACTÉRISATION PAR DIFFRACTION X DE L'ATTAQUE SULFATIQUES	94
IV.2.6.3. CARACTÉRISATION PAR DIFFRACTION X DE L'ATTAQUE ACIDES	96
IV.3. CONCLUSION	98
CONCLUSION GÉNÉRALE	99
ANNEXE	105
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	120

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Visualisation au MEB du béton courant et du BHP (Grossissement 5000)	9
Figure I.2. Représentation schématique de la microstructure de deux pâtes de ciments fraîches et durcies de rapports E/L égaux à 0,65 et 0,25	10
Figure I.3. Transfert des efforts des granulats dans un BHP et un BO	10
Figure I.4. Étalement des coûts sur le cycle de vie du béton usuel et du BHP	12
Figure I.5. Utilisations d'un superplastifiant	25
Figure I.6. Comportement rhéologique du BHP	27
Figure I.7. Courbes de porosité au mercure de BHP et d'un béton normal	29
Figure I.8. Principales agressions et attaques du béton	33
Figure I.9. Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques	35
Figure I.10. Organigramme de la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke proposée pour formuler des BHP	37
Figure I.11. Relation proposée entre le rapport E/L et la résistance à la compression	38
Figure I.12. Détermination du dosage en eau	38
Figure I.13. Dosage en gros granulat	39
Figure I.14. Différents types de ponts réalisés en BHP	43
Figure I.15. Différents types de bâtiments réalisés en BHP	44
Figure I.16. Différents types de tunnels réalisés en BHP	44
Figure II.1. Aspect général du sable de dune (avant et après broyage)	48
Figure II.2. Spectre DRX du sable de dune broyé et du fillers calcaires	49
Figure II.3. Aspect général du déchet de concassage (avant et après tamisage)	49
Figure II.4. Diffractogramme aux rayons X des fillers calcaires.	50
Figure II.5. Spectre DRX du sable alluvionnaire	50
Figure II.6. Aspect général des grains de sable alluvionnaire	51
Figure II.7. La courbe granulométrique du sable alluvionnaire utilise	51
Figure II.8. Courbes granulométriques des graviers de fraction 3/8 et 8/15	52
Figure II.9. Conservation des éprouvettes dans les milieux de conservation	56
Figure II.10. Détail des cycles « immersion-séchage »	59
Figure III.1. Représentation des mélanges à (03) constituants sur un triangle équilatéral	64
Figure III.2. Substitution de ciment par des ajouts de minéraux	65
Figure III.3. Représentation triangulaire des 21 combinaisons étudiées à trois constituants	66
Figure III.4. Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours	72
Figure III.5. Courbes iso-réponses de la résistance à flexion à 7 jours et à 28 jours	73
Figure III.6. Courbes iso-réponses de l'affaissement	74
Figure III.7. Profileur de prévision de l'affaissement en fonction de ciment, SDB et FC	74
Figure IV.1. Variation de masse en fonction de la période des cycles d'immersion-séchage dans l'eau saturée en chaux	78
Figure IV.2. Variation de masse des bétons conservés dans la solution de MgSO ₄	79
Figure IV.3. Variation de la perte en masse des bétons conservés dans la solution de HCl	81

Figure IV.4. Evolution de la résistance à la compression des BHP pendant la période des cycles « immersion-séchage » dans la solution 10% de chaux	82
Figure IV.5. Évolution de la résistance à la flexion durant la période d'immersion-séchage en solution de 10% de chaux	83
Figure IV.6. Evolution de la résistance à la compression des BHP conservés durant la période des cycles d'immersion-séchage dans la solution de MgSO ₄	83
Figure IV.7. Evolution de la résistance à la flexion des bétons conservés dans la solution de MgSO ₄	85
Figure IV.8. Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction de la période d'immersion-séchage dans 3% de HCl	86
Figure IV.9. Evolution de la résistance à la flexion des BHP en fonction de la période d'immersion-séchage dans 3% de HCl	87
Figure IV.10. Evolution des changements de longueur des BHP conservés dans les différents milieux de conservation	88
Figure IV.11. Résistances à la compression des BHP à 180 jours	89
Figure IV.12. Résistances à la flexion BHP à 180 jours	90
Figure IV.13 : Etat de surface des éprouvettes de BHP17 après 180 jours d'immersion-séchage dans les différents milieux	91
Figure IV.14 : Etat de surface des éprouvettes de BHP16 après 180 jours d'immersion-séchage dans les différents milieux	91
Figure IV.15 : Etat de surface des éprouvettes de BHP21 après 180 jours d'immersion-séchage dans les différents milieu	92
Figure IV.16 : Spectre DRX des BHP conservés dans l'eau saturée en chaux après 180 jours.	93
Figure IV.17 : Spectre DRX des BHP conservés après 180 jours d'immersion-séchage dans la solution de 10% de MgSO ₄ .	95
Figure IV.18 : Spectre DRX des BHP conservés après 180 jours d'immersion-séchage dans la solution de 3% de HCl.	97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Echelle de classification des bétons en fonction de la résistance f_{c28}	7
Tableau I.2. Les différentes classes de BHP	8
Tableau I.3. Comparaison entre les formules traditionnelles et le BHP	11
Tableau I.4. Principales caractéristiques des bétons testés par Paultre et al	31
Tableau II.1. Propriétés physico-mécaniques du ciment utilisé	47
Tableau II.2. Analyse chimique du ciment utilisé	47
Tableau II.3. Analyse chimique du sable de dune broyé	48
Tableau II.4. Composition chimique du filler calcaire utilisé	49
Tableau II.5. Caractéristiques physiques des fines calcaires	50
Tableau II.5. Caractéristiques physiques du sable utilisé	52
Tableau II.6. Analyse chimique de l'eau utilisée	53
Tableau III.1. Proportions des facteurs dans les compositions étudiées	66
Tableau III.2. Formulations des mélanges selon un plan de mélange	68
Tableau III.3. Résultats des essais de caractérisation	69
Tableau III.4. Coefficients et paramètres d'estimation des modèles des réponses étudiées	70

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le matériau béton, est irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Le compromis trouvé entre résistance mécanique, économie, esthétique et facilité de mise en œuvre, offre à ce matériau la première place dans la construction au niveau mondial [1]. Au niveau régional et national, le béton est le matériau de construction utilisé par excellence au sein de tous les chantiers, aussi bien dans les secteurs du bâtiment que dans ceux des travaux publics ; il n'a pas de substitut économique et performant à condition qu'il présente les qualités requises [2].

Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué mais, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées, qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était jusque là destiné, ont été réalisées [3]. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP) [3]. D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres (BFM), les bétons de poudre réactive (BPR), etc. [3].

Ces dernières années ont vu une révolution dans le domaine du béton, avec l'apparition des bétons à hautes performances et ultra-hautes performances, plus résistants, plus ductiles et plus durables. Ces innovations n'auraient pu voir le jour sans un important travail de recherche, qui a permis de développer une connaissance à l'échelle microscopique des mécanismes de comportement du béton. Deux voix de recherche sont à l'origine du développement spectaculaire des BHP [4]:

- ✚ L'apparition d'une nouvelle génération de superplastifiant hautement réducteur d'eau, à double action dispersion et défloculation. Cela est obtenu grâce à l'utilisation de polymères modernes (polysulfonate et polycarboxylates), qui offrent la possibilité d'une réduction sensible du dosage en eau, ce qui permet de formuler des bétons avec un rapport eau/ciment inférieur à 0.3, et par conséquent un béton plus résistant.
- ✚ L'amélioration de l'étendu granulaire par l'ajout d'additions minérales sous forme de fillers qui a un double rôle : d'une part, l'augmentation de la compacité par remplissage d'une partie de volume des vides et micro vides, et d'autre part, et grâce à leur réactivité chimique, la formation d'hydrates secondaires qui améliore la résistance et la durabilité [5].

Le développement des bétons à hautes performances passe, en général, par l'utilisation des additions minérales pouzzolaniques parmi lesquelles on trouve la fumée de silice [6].

Or ce sous-produit de l'industrie du silicium et des alliages ferro-siliceux devient onéreux du fait de sa capacité de production limitée dans les pays industrialisés et son inexistence dans certains d'autres pays comme l'Algérie.

Le contexte algérien exige, alors, de trouver d'autres moyens et techniques nécessaires afin d'améliorer les propriétés d'un béton à haute performance. Ces impératifs nous ont conduit à rechercher un substitut à la fumée de silice.

C'est dans cette optique, donc, que le présent travail a été entrepris. L'objectif principal de ce dernier sera axé sur l'étude de la possibilité d'utiliser le sable de dunes et les déchets de concassage de la région de Laghouat comme d'autres substituts à la fumée de silice dans la fabrication des bétons à hautes performances et de mettre à la disposition de notre industrie sur le marché un produit de matières locales présentant de bonnes caractéristiques qui peuvent donner des bétons à hautes performances. L'étude prévue va se concentrer surtout sur le comportement rhéologique à l'état frais, sur le comportement mécanique à l'état durci et sur la durabilité du béton à haute performance élaboré par la substitution d'une partie du ciment par du sable de dune finement broyé et des fines calcaires.

Pour mener à bien ce travail, on va commencer par proposer une approche théorique et expérimentale contribuant à la formulation d'un béton à hautes performances, en utilisant une technique moderne telle que la l'approche des 'plans de mélanges'. Un plan de mélange bien déterminé va être utilisé afin de développer quelques modèles qui prédisent le comportement du composite étudié, à l'état frais et à l'état durci afin d'optimiser sa composition. Ces modèles permettent de comprendre les rôles joués par les différents constituants et paramètres (à savoir: ciment, sable de dunes broyés et filler calcaire) et les effets de leurs interactions sur les propriétés pertinentes du BHP.

Il convient de noter aussi que ces dernières années, la détérioration rapide de diverses structures en béton a été un problème largement identifié dans le monde. La pénétration des ions chlorure dans les structures en béton renforcé d'acier s'est avérée la principale cause de la corrosion prématurée pouvant favoriser leur détérioration.

Par ailleurs, les milieux acides sont aussi très agressifs pour les structures en béton et favorisent leur dégradation. Ces dernières ainsi atteintes nécessitent une restauration importante. C'est pour cela que dans ce travail de thèse envisagé, une étude de durabilité du béton vis à vis de différentes agressions chimiques sera également menée.

Pour atteindre ces objectifs, notre présente thèse est divisée en quatre chapitres :

- ✎ **Le premier chapitre** consiste à présenter une synthèse bibliographique sur les bétons à hautes performances : définition du BHP, différence entre ce béton et le BO, BHP spéciaux, constituants du BHP, propriétés du BHP à l'état frais et à l'état durci. Une étude sur la formulation de ce type de béton sera également présentée. Enfin, quelques exemples d'applications réalisées en béton à haute performance à travers le monde.
- ✎ **Le deuxième chapitre** présente les différents résultats expérimentaux obtenus lors de la caractérisation des matériaux de base, puis l'ensemble des techniques expérimentales utilisées pour les différents essais de caractérisation.
- ✎ **Le troisième chapitre** fait l'objet d'une analyse et discussion des résultats trouvés à l'issue d'un programme expérimental résultant de l'application d'un plan de mélange. A partir de la base de données issue de l'application de ce plan, nous présentons des analyses statistiques permettant de trier l'influence des facteurs étudiés (le dosage de ciment (C), le dosage du sable de dunes broyés (SDB), le dosage du filler calcaire (FC)) par ordre d'importance, sur l'affaissement et la résistance mécanique à 7 jours et à 28 jours des BHP préparés. Les modèles mathématiques ainsi trouvés, permettent de déceler

l'effet de chaque facteur séparément et en interaction avec d'autres facteurs sur les réponses étudiées.

- ✎ **Le quatrième chapitre** présente une étude expérimentale axée essentiellement sur la durabilité des bétons à hautes performances étudiés vis-à-vis des attaques chimiques en milieux acides et sulfatiques et des cycles “mouillage/séchage”.

Tout cela est enfin clôturé par une conclusion générale regroupant une synthèse générale de l'ensemble des résultats obtenus, suivie d'une présentation de quelques nouvelles perspectives de recherche.

Chapitre I
Rappels théoriques et
synthèses bibliographiques

I.1. HISTORIQUE

La résistance à la compression est généralement considérée comme la principale propriété caractéristique du béton. Depuis la découverte du béton armé, les études ont été axées sur la recherche de méthodes permettant de renforcer cette résistance.

Aux Etats-Unis, durant les années 1950, une résistance à la compression de 35 MPa était considérée comme une résistance élevée. Dans les années 1970, quand la résistance à la compression du béton qui était utilisé dans des colonnes de quelques gratte-ciel était supérieure à celle des bétons usuels utilisés dans la construction courante, aucun doute n'était possible, il était tout à fait légitime d'employer l'expression béton à haute résistance qui est simplement des bétons usuels améliorés.

Après plusieurs décennies laissant les propriétés du béton sensiblement à leur état d'origine, les années 1980 virent quelques ingénieurs et quelques chercheurs avides de pluridisciplinarité s'associer pour " ouvrir la boîte noire " afin de donner de nouvelles propriétés constructives à ce matériau désormais devenu universel. Ainsi naquit une nouvelle génération de bétons, bétons pour la première fois appelés par Roger Lacroix et Yves Malier, en 1981 et 1982, lors des Assises nationales de la Recherche, " bétons à hautes performances "(BHP) [7], et parfois nommés durant cette décennie par les responsables de l'American Concrete Institute, " the French Approach " [8].

Cependant, lorsque l'on a commencé à utiliser les superplastifiants pour diminuer le rapport 'Eau/Liant', et non comme de simples fluidifiants, on a découvert que les bétons ayant un faible rapport 'Eau/Liant' voyaient plusieurs autres de leurs caractéristiques s'améliorer comme leur maniabilité, leur module élastique, leur résistance à la flexion, leur perméabilité et leur durabilité ; donc l'expression béton à haute résistance n'était plus adéquate pour décrire l'amélioration globale des propriétés de cette nouvelle famille de bétons [9].

Par conséquent, l'appellation béton à haute résistance s'est modifiée de façon significative ces dernières années par l'expression « béton à haute performance (BHP) » qui a commencé à être de plus en plus utilisée.

C'est ainsi que le béton autocompactant a été initialement décrit au Japon comme un béton à hautes performances, en raison de son ouvrabilité exceptionnelle et de sa (très probable) amélioration au niveau de la durabilité.

I.2. DÉVELOPPEMENT HISTORIQUE

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) sont apparus il y a environ une trentaine d'années. De résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 100 MPa, ils présentent un squelette granulaire conventionnel noyé dans une matrice de compacité accrue grâce à l'utilisation de superplastifiants (réducteurs d'eau) et des produits ultrafins amorphes ou cristallisés jouant à la fois un rôle de complément granulaire et pouzzolanique. En plus de la fumée de silice jusqu'alors reconnue comme jouant le mieux ce rôle, d'autres ultrafins (laitier, métakaolin, cendres volantes ...) peuvent être utilisés.

Au début des années 1960 dans la région de Chicago, les bétons à haute résistance ont, en quelque sorte, vu le jour et ont commencé à être utilisés en quantité non négligeable dans plusieurs structures majeures. Même si la résistance des premiers bétons à hautes résistance

qui ont alors été développés peut paraître modeste de nos jours, il faut se rappeler qu'à cette époque les bétons usuels avec lesquels on construisait des structures avaient une résistance à la compression essentiellement comprise entre 15 et 30 MPa.

Avant 1980, les BHP (Bétons à Hautes Performances) ou BHR (Bétons à Hautes Résistances) étaient uniquement produits en laboratoire. Cette situation a beaucoup évolué vers les années quatre vingt, avec l'arrivée des superplastifiants et des fumées de silice. En effet, vers 1970, les restrictions environnementales ont contraint les industries de ferro-silicium à collecter la poussière de leurs cheminées. Comme conséquence, ces fumées se sont retrouvées dans l'industrie du béton [10].

Vers ces années, les seuls bétons à hautes résistances à air entrainé qui ont été développés étaient ceux utilisés dans la zone de marnage des plates-formes pétrolières.

Vers la fin des années 1980, plusieurs pays ont lancé des projets de recherche spécifiques sur le BHP. Parmi ceux-ci on retrouve les Etats-Unis, la Norvège, le Canada, la France, la Suisse, l'Australie, l'Allemagne, le Japon, la Corée, la Chine et Taiwan [7,9,11].

De résistance en compression de l'ordre de 50 MPa, les BHP ont été utilisés pour la première fois en 1984 dans la construction d'un petit pont [12].

De nos jours, la production de bétons de résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 100 MPa est très fréquente dans bons nombres de laboratoires dans le monde et leur utilisation sur les chantiers commence à se développer.

I.3. CLASSIFICATIONS DES BÉTONS

La classification actuelle des bétons est basée sur la résistance en compression à 28 jours (tableau I.1). Un Béton Ordinaire (BO) a une résistance comprise entre 20 et 40 MPa, un Béton à Hautes Performances (BHP) a une résistance située entre 40 et 80 MPa [13] , pour des valeurs comprises entre 80 et 120 MPa, on parle de Bétons à Très Hautes performances (BTHP) et au-delà, de Bétons à Ultra Hautes Performances (BUHP) tels que les bétons de Poudres Réactives (BPR).

Tableau I.1. Echelle de classification des bétons en fonction de la résistance f_{c28} .

Résistance f_{c28} (MPa)	20 → 40	40 → 80	80 → 120	Supérieure à 120
Classe du béton	BO	BHP	BTHP	BUHP

La réglementation française pour le dimensionnement de structures en béton armé et précontraint (BAEL91 et BPEL99) [14] est valable pour des bétons dont la résistance varie entre 20 et 60 MPa. L'utilisation de bétons de résistance supérieure à 40 MPa est donc appelée à être développée par les constructeurs dans un avenir proche.

I.4. DÉFINITION DES BÉTONS Á HAUTES PERFORMANCES

Le béton à haute performance est un béton qui présente une résistance caractéristique à la compression à 28 jours (f_{c28}) supérieure à 50 MPa et un rapport pondéral E/C inférieur à 0.40 [15].

Dans certaines régions du monde, un béton est considéré comme de haute performance quand sa résistance dépasse 60 MPa. En Algérie, il est admis que dès que la résistance dépasse 40 MPa le béton peut être considéré comme de haute performance [16].

Ce matériau a acquis ses lettres de noblesse en étant perçu comme un nouveau type de béton. Ce dernier qui ne peut être produit n'importe comment ni par n'importe qui, est très surprenant tant ses performances et ses possibilités d'applications sont vastes. C'est un matériau de haute technologie. La résistance à la compression d'un tel béton peut atteindre des valeurs supérieures à 100 MPa et dans de certains cas 120 MPa à 150 MPa, selon la nature des granulats et son dosage en ciment [9].

Ils sont également plus résistants aux agents agressifs, aux phénomènes de gel-dégel et, de façon générale, présentent une durabilité accrue par rapport aux bétons ordinaire [11].

Ils ne sont pas des matériaux révolutionnaire, car ils contiennent exactement les mêmes constituants que les bétons ordinaires et ils étaient fabriqués avec la même technologie que celle utilisée pour fabriquer les bétons usuels, si ce n'est que les matériaux utilisés pour les fabriquer étaient choisis avec beaucoup de soin et étaient bien contrôlés [9].

I.4.1. DIFFÉRENTES CLASSES DE BÉTONS Á HAUTES PERFORMANCES

On peut diviser les BHP en cinq classes différentes définies chacune par des résistances à la compression qui peuvent être considérées comme des barrières technologiques dans l'état actuel de la technologie des BHP [9].

Les différentes classes correspondent chacune à une plage de résistance de 25 MPa et ne doivent pas être considérées comme des limites absolues, mais plutôt comme des limites moyennes qui peuvent varier d'un endroit à l'autre.

Le tableau (I.2) ci-dessous présente les cinq grandes catégories de BHP :

Tableau I.2. Les différentes classes de BHP [9].

Résistance à la compression (MPa)	50→75	75→100	100→125	125→150	<i>Supérieure à 150</i>
Classe de BHP	<i>Classe I</i>	<i>Classe II</i>	<i>Classe III</i>	<i>Classe IV</i>	<i>Classe V</i>

Ces résistances à la compression sont celles obtenues sur des cylindres de 100x200mm mûris de façon normalisée comme pour les bétons usuels et mis à l'essai à 28 jours.

I.4.2. DIFFÉRENCE ENTRE LE BHP ET LE BÉTON ORDINAIRE

Les bétons à hautes performances (BHP) se différencient des bétons usuels par la propriété essentielle qui est leur grande résistance mécanique en compression et par leur faible rapport Eau/Liant. Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés d'une forte réduction de leur porosité.

❖ La démarcation entre un béton usuel et BHP devient de plus en plus facile, surtout lorsque l'on observe leurs microstructures (Figure I.1). Des études en microscopie électronique [17] ont montré que le béton ordinaire qui a un rapport 'Eau/Liant' élevé a une microstructure très

poreuse; cette zone poreuse se développe spécialement autour des granulats. Plus le rapport 'Eau/Liant' est élevé, plus la microstructure de cette zone est poreuse et plus l'épaisseur de la zone de transition est importante. Par conséquent, le transfert des contraintes entre la pâte de ciment hydraté et les granulats dans un béton usuel est plutôt déficient.

❖ Dans le cas des BHP, la microstructure est beaucoup plus compacte, particulièrement dans la zone de transition autour des gros granulats qui est très mince, ou qui a même disparu complètement. Cette zone joue un rôle crucial lors de la reprise des contraintes par le béton [18].

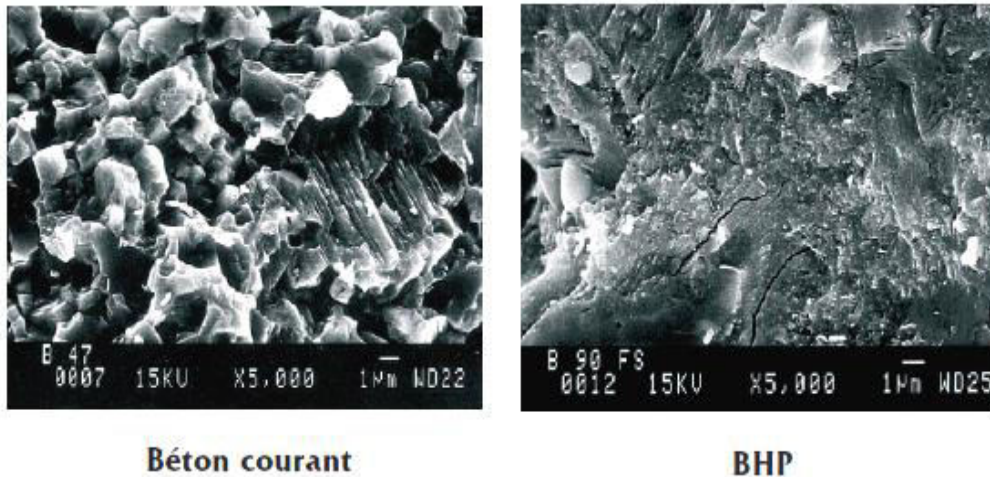


Figure I.1. Visualisation au MEB du béton courant et du BHP (Grossissement 5000) [17].

❖ Outre que le BHP est caractérisé par son faible rapport 'Eau/Liant' cela veut dire que les particules de ciment se rapprochent les unes des autres dans le mélange fraîchement malaxé (Figure I.2). La Figure I.2 présente schématiquement deux pâtes de ciment à l'état frais et à l'état durci ayant des rapports 'Eau/Liant' de 0,65 et de 0,25. Lorsque ces deux pâtes ont durci, elles présentent des microstructures très différentes.

On peut voir que dans une pâte de ciment où le rapport 'Eau/Liant' est égal à 0,65, les particules de ciment sont relativement éloignées les unes des autres. Par contre, la pâte de ciment hydraté qui a un rapport 'Eau/Liant' de 0,25 remplit rapidement l'espace intergranulaire, ce qui conduit à des gains de résistance relativement rapides (Figure I.2).

Cette différence de microstructure des BHP a deux conséquences très importantes du point de vue résistance à la compression et du point de vue perméabilité : la résistance à la compression d'un BHP augmente de façon spectaculaire au fur et à mesure que le rapport 'Eau/Liant' et la perméabilité d'un BHP est considérablement plus faible que celle d'un béton usuel.

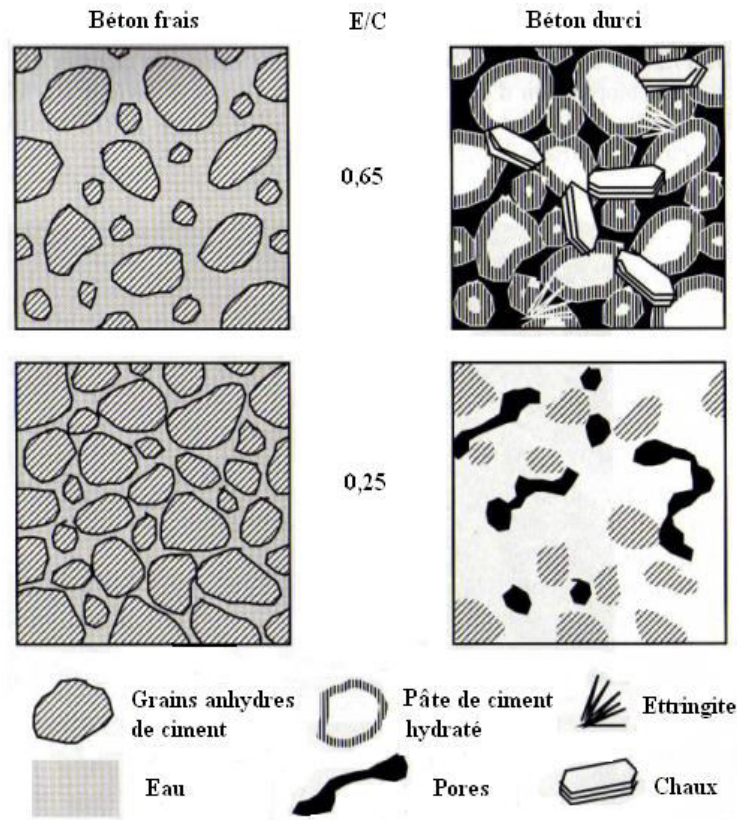


Figure I.2. Représentation schématique de la microstructure de deux pâtes de ciments fraîches et durcies de rapports E/L égaux à 0,65 et 0,25 [9].

❖ Le béton à haute performance se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice sera pratiquement égale à la résistance des granulats. A l’approche de la rupture, les fissures se seront désormais généralement propagées au travers des granulats (Figure I.3) [18].

Par contre dans le béton usuel, les fissures d’adhérence entre la matrice de mortier et le granulat se propageront autour des granulats (Figure I.3).

Le béton usuel cédera sous l’effet de tout un réseau de fissures interrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage.

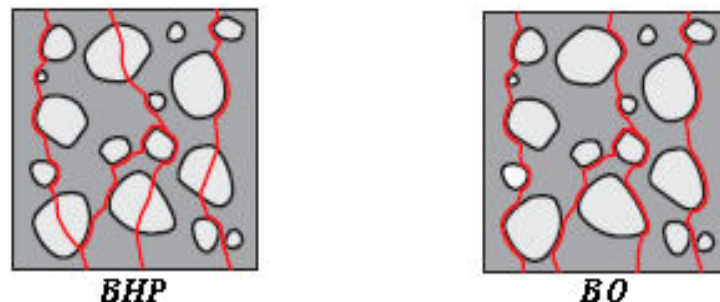


Figure I.3. Transfert des efforts des granulats dans un BHP et un BO [18].

BHP : les granulats sont également fissurés.

BO : fissures d’adhérence et fissures dans le mortier.

❖ Une autre distinction qui existe entre les BHP et les bétons traditionnels se situe au niveau de leur composition qui fait intervenir de nombreux constituants jouant tous un rôle bien spécifique.

En plus, les BHP sont des matériaux dont la formulation est optimisée de manière à atteindre des propriétés précises. Il apparaît donc normal que la précision nécessaire à leur calcul soit en rapport avec la précision de leur fabrication.

Le tableau I.3 montre que l'obtention de propriétés précises de ce béton repose sur des principes de formulations particulières. En plus des constituants de base présents dans les bétons traditionnels, on utilise des fumées de silice, des cendres volantes, ou encore des laitiers de haut fourneau qui viennent compléter la partie fine du squelette granulaire et améliorer les performances de la pâte.

Tableau I.3. Comparaison entre les formules traditionnelles et le BHP [19].

Type de béton	Eau (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Fumé de silice (kg/m ³)	Cendres volantes (kg/m ³)	laitiers (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Gravillon (kg/m ³)
Conventionnel	170	340	0	0	0	635	1270
BHP 80 MPa	150	315	36	0	137	745	1130
BHP 120 MPa	139	534	40	59	0	623	1069

❖ Contrairement au béton traditionnel, le BHP se caractérise par son faible rapport 'Eau/Ciment' qui implique l'utilisation de superplastifiant permettant de conserver une rhéologie compatible avec les contraintes de mise en place sur chantier, avec un taux dans le cas de BHP plus élevée que celui utilisé dans le béton normal.

❖ En effet, une des particularités de BHP, par rapport à celle du béton ordinaire, est le volume important de liant utilisé, d'ailleurs en partie responsable du surcoût de ses formules puisqu'il s'agit des constituants les plus onéreux. En d'autres termes, n'oublions jamais que le prix d'un ouvrage intègre, certes, le prix des matériaux de base qui le constituent, mais aussi l'amortissement des matériels que sa construction nécessite et le montant des opérations et adaptations que sa durée de vie réclame.

❖ De plus, les ouvrages en BHP durent plus longtemps et entraînent des frais d'entretien moins élevés que ceux en béton ordinaire [20]. La plus vaste utilisation du béton à haute performance intégrant des ajouts cimentaires pourrait donc entraîner des bénéfices tant environnementaux que financiers et construire des ouvrages plus durables [21].

Donc le choix du BHP comme matériau a un impact sur les coûts de construction initiaux, mais il a aussi des conséquences tout au long de la vie utile de l'ouvrage (Figure I.4).

De plus, le BHP avec des résistances élevées offre à la construction une durabilité meilleure à long terme et permet des économies de matériaux allant jusqu'à 40 % [22].

Ces coûts seront toutefois étalés différemment dans le temps selon le matériau utilisé, car le BHP a une durée de vie plus longue que celle du béton usuel (Figure I.4).

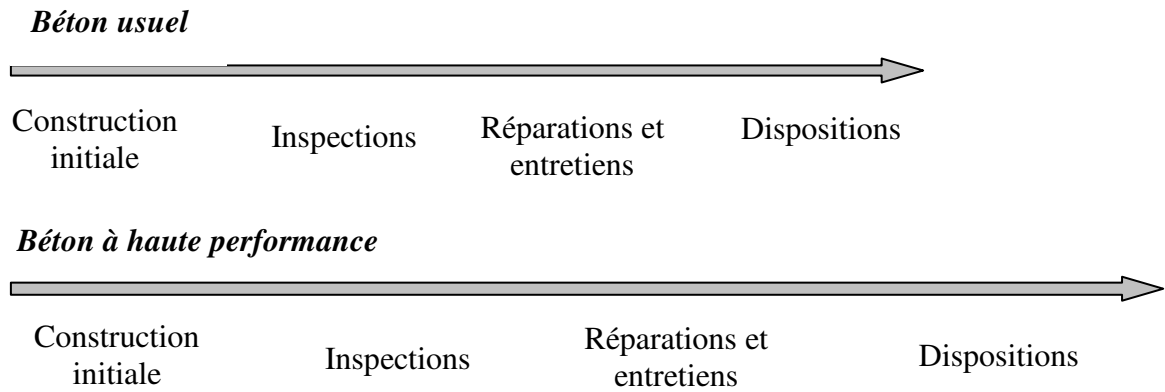


Figure I.4. Étalement des coûts sur le cycle de vie du béton usuel et du BHP [20].

I.5. TYPE ET CLASSIFICATION DES BHP

I.5.1. BHP LÉGER

Grâce aux ajouts minéraux, aux adjuvants et aux granulats légers de grande qualité maintenant disponibles, il est aujourd'hui possible de fabriquer des bétons légers à haute performance dotés d'une très bonne rhéologie et d'une excellente durabilité. Les conditions nécessaires pour développer au maximum leur résistance en compression ne sont toutefois pas encore complètement maîtrisées. En effet, bien que certaines formulations aient pu atteindre une résistance en compression de 70 à 100MPa à 28 jours, il est encore difficile d'obtenir plus de 60 MPa pour une masse volumique inférieure à 1900 kg/m³ [23].

Berra et Ferrara ont fabriqué un BHP léger ayant une résistance à la compression de 60 MPa (mesurée sur cubes de 150 mm de côté) ayant une masse volumique de 1700 kg/m³.

En outre, Nilsen et Aitcin ont fabriqué un BHP léger ayant une résistance à la compression de 97,7 MPa à 91 jours (mesurée sur des cylindres de 100×200 mm) dont la masse volumique à l'état frais était de 2085 kg/m³ [9].

Par ailleurs, on peut remarquer que les bétons légers à haute performance fabriqués par Zhang et Gjorv ont surpassé le plafond de résistance généralement observé de 60 à 70MPa. Tout en utilisant des granulats de bonne qualité, la particularité de leurs formulations tient essentiellement sur l'utilisation d'excellentes matrices et de sable léger. Les dosages en ciment utilisés varient entre 400 et 600 kg/m³ (ciment Type III à haute résistance et 10 % de fumée de silice) [9].

En effet, la diminution du poids des structures construites avec des BHP légers permet entre autres d'utiliser des portées plus longues ou de diminuer les sections des éléments porteurs, de réduire la quantité d'acier d'armature et même les dimensions des fondations.

I.5.2. BHP LOURDS

A l'inverse des BHP légers, l'emploi de granulats très denses permet la réalisation de BHP de masse volumique dépassent 3000 kg/m³.

Les granulats lourds utilisés dans la confection des BHP lourds sont de granulats spéciaux de densité élevée comme la barytine, l'ilménite et l'hématite.

Nilsen et Aitcin ont fabriqué deux BHP lourds ayant des masses volumiques de 3340 kg/m^3 et 3805 kg/m^3 . Ils ont montré que le retrait de séchage des BHP lourds semble inférieur à celui des BHP ordinaires qui ont le même rapport 'Eau/Liant' [9]. Aussi, ils ont trouvé que le module élastique d'un BHP lourd était bien supérieur à celui d'un béton de densité ordinaire.

Ces bétons sont utilisés dans la protection contre les radiations ou pour réaliser des culées, des contre poids.

I.5.3. BHP RENFORCÉS DE FIBRES

Avec l'augmentation de la résistance à la compression, le BHP devient peu ductile, et donc ajouté au manque de ductilité des bétons en général tel que constaté lors des différents séismes qui se sont produit à travers le monde.

Cette fragilité entraîne des problèmes de conception et de dimensionnement pour certains types de structures. Néanmoins, ce comportement fragile peut être évité par adjonction de fibres métalliques à la composition initiale du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture d'abord de la microfissuration et puis couture de la macrofissuration.

Parmi les types de fibres les plus utilisées pour améliorer la ductilité et la résistance aux impacts des bétons, nous citons les fibres d'acier, de verre, d'amiante et de polypropylène.

Les fibres les plus utilisées dans le cas des BHP sont les fibres d'acier qui peuvent être utilisées avec des propriétés spécifiques [9].

Les fibres retardent la microfissuration et améliorent le comportement post-fissuration en maintenant les différents blocs de béton. Elles empêchent le retrait au jeune âge et s'opposent au faïençage (le faïençage correspond à l'apparition de nombreuses fissures très fines qui forment un réseau hexagonal ou octogonal). Le retrait du béton peut être diminué de 35 % ou moins si l'on ajoute 1,5 % de fibres par volume.

En outre, les fibres augmentent la résistance au choc et réduisent le fluage du béton.

Certains projet et essais de chantier comportant l'utilisation de BHP renforcés de fibres ont été récemment conduits par des chercheurs de l'université de Sherbrooke : dans un projet particulier, le recouvrement en béton bitumineux d'un tablier de pont orthotrope en acier a été remplacé par une couche de 50 mm d'épaisseur de BHP renforcé de fibres. Ce projet a permis de voir qu'il était possible de concevoir, produire et livrer un BHP de chantier très résistant et très ductile en utilisant des fibres d'acier [9].

I.5.4. BHP COMPACTÉ AU ROULEAU

Le BHP compacté au rouleau est un béton qui résiste parfaitement aux produits pétroliers et autres solvants, huiles et graisses qui attaquent et désagrègent l'enrobé.

En effet, le BHP compacté au rouleau prévient l'écoulement dans le sol, pour une meilleure protection de l'environnement. Les usines de compostage font appel au BCR précisément pour cette qualité et aussi pour sa résistance à la chaleur générée par le compost [24].

Le BHP compacté au rouleau est considéré comme un pavage rigide, il est très performant lorsqu'il s'agit de supporter les charges, donc que sa résistance en flexion est élevée.

Il est utilisé pour la construction des barrages en raison de sa faible chaleur d'hydratation initiale (béton de masse) et aussi très utilisé au Canada dans la construction des routes.

I.5.5. BHP Á AIR ENTRAÎNÉ

L'addition d'une faible quantité d'air entraîné améliore de façon considérable la maniabilité d'un BHP et sa finition et diminue légèrement le dosage en superplastifiant, en rendant les bétons qui ont un faible rapport 'Eau/Liant' un peu moins cohésifs et plus faciles à mettre en place, mais ne rend pas simplement les BHP plus durables face aux cycles de gel-dégel.

La résistance à la compression de tels bétons est évidemment plus faible, mais cette diminution de la résistance peut être facilement compensée par une diminution légère du rapport 'Eau/Liant'.

I.5.6. BHP CONFINÉS

Les éléments de structures en béton à haute performance ont longtemps été considérés comme étant fragiles. Ceci retarde l'utilisation du BHP en zone sismique et contribue à une certaine défiance des ingénieurs vis-à-vis des BHP [25].

Les BHP confiné sont abordés simplement pour rappeler aux concepteurs qu'il s'agit d'une façon très simple d'augmenter la résistance à la compression des BHP, et surtout leur ductilité, sans cependant augmenter leur module élastique.

Quelques gratte-ciel ont été construits en tenant compte de cet avantage, c'est le cas du gratte-ciel Two Union construit à Seattle aux Etats-Unis [9].

Le BHP se confine dans des tubes d'acier, des spirales et des étriers mais le confinement dans un tube d'acier soit plus efficace que celui que l'on peut obtenir avec des spirales ou des étriers.

I.6. LES AVANTAGES DES BHP

Les avantages liés au BHP sont très nombreux [26] :

- ❖ Haute résistance en compression, permettant de réduire les sections des éléments de béton ;
- ❖ Meilleure durabilité, grâce à une compacité élevée due au faible rapport 'Eau/Ciment' et à la présence du fumé de silice ;
- ❖ Meilleure résistance aux phénomènes gel-dégel ;
- ❖ Résistance élevée au jeune âge facilitant l'optimisation des cycles de décoffrage et de mise en tension des câbles de précontrainte ;
- ❖ Moindre retrait limitant la fissuration ;
- ❖ Résistances en traction supérieures, ce qui permet de limiter la précontrainte et d'amincir la section transversale en béton ;
- ❖ Performances en flexion qui se traduisent par une augmentation de la rigidité en flexion et qui permettent un allongement des portées et offrent des gains importants de poids propre, générant des économies de fondations ;

- ❖ Fluage inférieur à celui des bétons ordinaires et évolution plus rapide. Il en résulte des redistributions d'efforts plus faibles au cours de la durée du chantier et des premières années de mise en service et des déformations des structures moindres, ce qui autorise la conception de structures plus élancées et permet d'assurer un meilleur contrôle géométrique des ouvrages et une meilleure efficacité de la précontrainte. Les faibles déformations différées permettent de réduire les pertes de précontrainte;
- ❖ Réduction de l'ouverture de fissures. L'emploi de BHP permet de réduire l'ouverture des fissures à contraintes égales dans les armatures et donc d'augmenter la résistance à la fissuration et à la ruine des structures ;
- ❖ Perméabilité 10 fois plus faible, ce qui assure une excellente protection des aciers (très faible pénétration des chlorures) ;
- ❖ Mise en œuvre facile et absence de ségrégation grâce à l'excellente cohésion [27].

L'ensemble de ces propriétés permet de réduire le coût global d'un ouvrage par :

- L'allègement des structures imposé par certaines exigences architecturales ;
- L'optimisation du chantier ;
- La diminution des coûts de maintenance.

En particulier, sa microstructure très dense rend le béton à haute performance parfaitement adaptés aux applications d'architecture, car il peut être poli facilement comme le granit et le marbre [28].

La caractéristique de rigidité exceptionnelle de béton à haute performance est un avantage considérable de la construction des bâtiments soumis à des efforts latéraux dus aux vents [28].

Par contre, les bétons à hautes performances ont une chaleur d'hydratation élevée et un retrait élevé qui implique l'importance de la cure [29].

I.7. CONSTITUANTS DES BÉTONS Á HAUTES PERFORMANCES

Le béton à haute performance est composé des mêmes matériaux que le béton ordinaire. Leur technologie est plutôt un développement logique de béton contenant à la fois de la fumée silice et du superplastifiant.

Le BHP, qui sont avant tout une modification des bétons ordinaires, sont influencés de la même façon par les différents matériaux cimentaires. Il se compose de granulats, d'eau, de ciment, de superplastifiant, un retardateur de prise y est parfois ajouté pour augmenter le temps de mise en œuvre et éventuellement d'une addition. Il ne contient pas de constituants vraiment précieux ou inhabituels.

I.7.1. CIMENT

Le choix du type de ciment est fonction, en particulier, des propriétés liées aux dispositions constructives : exothermie, retrait, résistance au jeune âge et du type d'actions environnementales auquel le béton est soumis (sels de déverglaçage, solutions acides, solutions salines, etc.).

Les ciments les mieux adaptés à la confection de bétons à hautes performances pour lesquels la résistance doit être élevée, sont les ciments CPA-CEM I des classes 52.5 ou 52.5 R et CPJ-CEM II/A 52.5 ou 52.5 R avec l'emploi de superplastifiant réducteur d'eau [30]. A

noter que l'emploi de CPJ-CEM II/A 52.5 (D) particulièrement adapté à cet emploi ne dispense pas de l'ajout d'un superplastifiant réducteur d'eau. Les dosages sont généralement compris entre 400 et 450 kg/m³, voire 480 kg/m³.

D'une manière générale, les classes de résistance des ciments les plus utilisées pour la formulation d'un BHP, sont : CEM I, CEM II ou CEM III, classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 [17] conformés à la norme [NF EN 197-1].

Du point de vue rhéologique, le ciment idéal pour un béton à haute performance devrait ne pas être trop fin (probablement jusqu'à 400 m²/kg déterminé par la méthode de Blaine) [31].

Des chercheurs de l'institut FEEHS de recherche [32] sur les matériaux de construction à Duisburg ont étudié la fabrication de béton à haute performance à partir de ciment de haut-fourneau. L'étude montre qu'il est préférable d'utiliser jusqu'à 95% de ciment de haut-fourneau, un matériau fabriqué à partir de résidus de la sidérurgie, plutôt que du ciment Portland, ce qui permet de préserver les ressources naturelles et l'environnement. En effet, la fabrication du ciment de haut-fourneau consomme moins d'énergie primaire et dégage moins de CO₂. De plus, le béton fabriqué à partir de ciment de haut-fourneau présente de nombreux avantages : il est plus compact et moins poreux; il se fissure moins fréquemment sous contraintes thermiques; il résiste mieux aux agressions chimiques.

I.7.2. GRANULATS

Bien que des granulats ordinaires soient utilisés pour confectionner le béton à haute performance et vu que les granulats représentent environ les trois quarts du volume de béton et qu'ils jouent un rôle primordial de remplissage et de support, ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air.

Les formations géologiques à partir desquelles il est possible de produire des granulats à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière.

Compte tenu des faibles dosages en eau des BHP, il convient de privilégier des granulats peu poreux afin de limiter l'absorption d'eau par les granulats, pour favoriser le maintien rhéologique du béton [33].

I.7.2.1. SABLES

Les granulats fins que l'on utilise pour fabriquer des BHP ont une distribution granulométrique comprise dans les limites recommandées par la norme [ACI] pour les bétons usuels. Cependant, les granulats fins doivent être situés sur la partie grossière de ces limites. C'est-à-dire un module de finesse élevé est préférable pour le sable utilisé en BHP en vu de réduire la quantité d'eau utilisée ce qui est un avantage du point de vue de la résistance et du point de vue économique [9].

Il faut que tous les sables utilisés pour fabriquer un BHP soient propres et ils ne doivent pas contenir de particules d'argile ou de silt, en autant que ces sables doivent contenir le moins

possible de particules supérieures à 5mm, lorsque ces particules sont plutôt friables, car elles constituent alors le maillon faible du BHP.

I.7.2.2. GRAVILLONS

Pour le BHP le granulat idéal doit être concassé, propre, de forme cubique, à angularité réduite et contenant le moins possible de particule plates ou allongées du fait de la faible résistance au plan de fissuration de ces dernières [34,35].

D'une manière générale, on doit utiliser des granulats de bonne qualité du point de vue rhéologique ; cela assure une bonne adhérence entre les gros granulats et la matrice cimentaire.

Le critère de la résistance des granulats est valable lorsqu'une résistance à long terme du béton à haute performance est nécessaire. La propreté des granulats, l'absence de poussières adhérentes et l'uniformité de la granulométrie sont essentielles, la durabilité des gros granulats est aussi indispensable lorsque le béton est exposé à des cycles de gel-dégel.

Par ailleurs, l'utilisation de très gros granulats n'est souhaitable parce qu'ils introduisent une hétérogénéité supplémentaire dans le système d'autant que plus la résistance à la compression visée est élevée, plus on a intérêt à utiliser un gros granulat ayant un diamètre maximale faible ; dans un BHP la dimension maximale des granulats est généralement inférieure à 12 mm [31], ce qui ne signifie pas qu'un granulat de 20 mm ne puisse être utilisé [9].

D'autre part, lorsque l'on recherche des résistances particulièrement élevées (supérieures à 100 MPa), les gros granulats doivent être choisis avec précaution et leur taille est parfois inférieure (D_{max} de 10 à 14 mm) à ceux utilisés pour les bétons traditionnels (20-30mm). L'expérience montre qu'il est très difficile de produire des BHP de classe III en utilisant des gros granulats supérieurs à 25 mm [9].

Des études pétrographiques peuvent être cependant utiles quand on veut utiliser des granulats naturels puisqu'elles donnent une indication de la résistance des différentes particules qui constituent le granulat.

Ces chercheurs [36] ont trouvé que : l'amélioration des caractéristiques mécaniques et élastiques d'un béton à haute performance est basée, entre autres, sur le choix des gros granulats qui peuvent constituer le maillon le plus faible.

I.7.3. L'EAU DE GÂCHAGE

L'eau a une place prépondérante dans la préparation du béton et son rôle apparaît d'autant plus important que sa quantité peut modifier la constitution même du béton.

En effet, l'eau que l'on introduit dans le béton lors de son gâchage remplit deux fonctions : une fonction physique qui confère au béton les propriétés rhéologiques d'un liquide et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction dite l'hydratation.

Une petite quantité d'eau suffit pour hydrater le ciment contenu dans le béton et lui apporter ses qualités de résistance. Mais l'eau est également présente, de manière presque

excédentaire, pour obtenir une bonne ouvrabilité du béton nécessaire à sa mise en place convenable dans les coffrages.

L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme [NF EN 1008] et convenable pour la fabrication de BHP.

Les autres, comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, eau d'origine souterraine, eau naturelle de surface et eau de rejet industriel, eau de mer et eau saumâtre, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire ainsi que les essais chimiques et mécaniques.

I.7.4. ADDITIONS MINÉRALES

Les additions minérales sont de plus en plus souvent utilisées par les producteurs de bétons. Puisqu'il s'agit généralement de sous-produits industriels, leur prise en compte dans la formulation des bétons pour le respect du dosage minimum en ciment revêt un intérêt particulier sur le plan économique (réduction du coût des matières premières) et écologique (réduction des émissions de CO₂ et de la consommation de ressources non renouvelables).

Les ajouts peuvent présenter trois types de comportement [37] :

↪ **Inerte :**

Un comportement inerte signifie qu'il n'y a pas de réaction chimique au sein du ciment lors de l'hydratation. Toutefois une phase inerte peu servir de support de croissance ou de nucléation aux phases hydratées formées durant l'hydratation et donc avoir un effet notable.

↪ **Hydraulique latent :**

Un constituant présente des propriétés de liant hydraulique latentes s'il est capable de s'hydrater et de faire prise de manière irréversible lorsqu'on le met en présence d'eau sous certaines conditions. Un ajout présentant des propriétés hydrauliques latentes va donc pouvoir former des hydrates comme cela se passe avec le clinker si des conditions favorables sont réunies. C'est le cas par exemple du laitier de haut fourneau qui doit au moins être activé comme par une solution alcaline pour s'hydrater.

↪ **Pouzzolanique :**

Un constituant présentant des propriétés pouzzolaniques contient des phases silicates et aluminates capables de former des hydrates du système ternaire CaO-SiO₂-Al₂O₃-H₂O en présence de chaux et d'eau. Utilisé en substitution du clinker dans le ciment, un ajout pouzzolanique va réagir en consommant la portlandite formée par l'hydratation du clinker et former un C-S-H. Le C-S-H formé présente en général un rapport C/S inférieur à celui du C-S-H formé par l'hydratation du clinker seul. Les cendres volantes sont un exemple d'ajout présentant des propriétés pouzzolaniques pour la formation des C-S-H « pouzzolaniques » dans un mélange clinker-ajout pouzzolanique.

I.7.4.1. FUMÉE DE SILICE

La fumée de silice est un coproduit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou de zircon. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours

à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrosilicium).

La fumée de silice est aussi appelée microsiline ou fumée de silice condensée, mais le terme fumée de silice est le plus généralement utilisé. Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise.

En particulier, pour la réalisation de bétons à hautes performances, il est habituel d'ajouter au ciment une poudre siliceuse ultrafine qui, d'une part, permet d'améliorer le squelette granulométrique du mélange en comblant les vides entre les grains du ciment, et d'autre part, intervient chimiquement, par effet "pouzzolanique" dans la réaction d'hydratation du ciment [38]. Généralement, cette poudre siliceuse est constituée de fumée de silice, c'est-à-dire un produit obtenu industriellement et présentant une granulométrie moyenne de 0,1 μm .

Le mécanisme de réaction pouzzolanique de la fumée de silice peut être brièvement décrit comme la réaction de la silice avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment, en présence de l'eau. Il en résulte des C-S-H à pauvre rapport 'Ca/Si'. Bien que cette réaction soit prompte et précoce, elle est limitée par la quantité d'eau dans les BHP [39].

La proportion de fumée de silice utilisée dans les BHP est relativement importante. Des études montrent que l'optimum de fumée silice a été trouvé entre 7 et 15 % en poids de ciment et pour des quantités supérieures, 40 % par exemple, le béton devient fragile, et des particules de fumée silice restent non hydratées [40].

Une autre étude expérimentale faite par S.Bhanja et B.Sengupta de l'université de Kolkata à l'Inde sur l'influence de la fumée de silice sur les performances mécaniques des bétons à haute performance (B.H.P) [41] a révélé que la résistance optimale à 28 jours pour la compression a été détectée à un taux de substitution variant de 15 à 25% avec un rapport E/L = 0.26.

De plus, la fumée de silice, lorsqu'elle est utilisée en proportions importantes, peut influencer défavorablement l'aspect extérieur du béton en raison de sa couleur sombre. De ce fait, alors que les bétons à hautes performances ont l'avantage de présenter un excellent aspect de surface après décoffrage, il est généralement nécessaire de recouvrir le béton d'un revêtement purement décoratif.

Wild et al. [42] précisent que les résistances encore beaucoup plus élevées sont atteintes à partir de 28% de fumée de silice (par rapport à la masse de ciment). Cependant, ce dosage conduit à des dépenses excessives et ce genre de béton est difficile à mettre en œuvre.

R. Duval et al. [43] a travaillé sur l'effet de la fumée de silice sur les propriétés du BHP. Ils se sont intéressés au remplacement d'une partie de ciment par différents pourcentages de fumées de silice (0%, 10%, 20% et 30%) avec un rapport Eau/Liant variant entre 0,25÷0.45 [48]. Ils concluent que la résistance augmente avec l'augmentation de la teneur des fumées de silice jusqu'à la substitution de 20% du ciment et atteint une valeur maximale, pour un pourcentage de 10 à 15% de fumée de silice [43].

L'ajout de fumée de silice améliore également de manière considérable la rhéologie du béton fabriqué. En effet, ces particules, de forme sphérique, jouent un rôle de lubrifiant avec un comportement semblable à celui d'un roulement à bille. Cependant, sa surface spécifique élevée en fait un matériau très demandeur en eau. L'augmentation du dosage en fumée de

silice au-delà de 8% entraîne un accroissement de la friction entre particules fines, rendant le béton plus collant et cohésif [44].

En outre, sa grande finesse lui donne une très bonne capacité de remplissage, et conjuguée à sa structure amorphe, la forte pouzzolanité qui en découle permet une augmentation des résistances du béton et une amélioration de sa durabilité [45].

I.7.4.2. LAITIER DE HAUT FOURNEAU

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de l'industrie de fabrication de la fonte. Il est composé d'oxydes. Les oxydes principaux entrant dans sa composition sont les mêmes que ceux qui entrent dans la composition du clinker de ciment Portland. Toutefois, les quantités présentes sont différentes de celles du clinker.

Comme c'est un sous-produit industriel, sa composition peut-être très variable en fonction de la composition de base du minerai utilisé [37].

Le laitier de haut fourneau broyé a déjà été et est utilisé comme ajout minéral dans de nombreux pays comme par exemple au Canada où son dosage est habituellement limité à entre 20 et 25 % en remplacement de ciment à cause d'une diminution significative de la résistance initiale et de la résistance à l'écaillage.

Les études de Mladenka et al. [46] ont montrés qu'en abaissant le rapport 'Eau/Liant' (E/L) du béton, on peut augmenter le taux de remplacement du ciment par du laitier jusqu'à 50 %, sans nuire à la résistance du béton à court terme et à sa résistance à l'écaillage. Les bétons qu'ils ont préparés avaient une maniabilité comparable à celle d'un béton de référence qui ne contenait pas de laitier, une résistance en compression suffisante pour permettre leur décoffrage à 24 h, une très faible perméabilité aux ions chlore, ainsi qu'une bonne résistance au gel-dégel et à l'écaillage à condition d'être mûris à l'eau un peu plus longtemps.

Une autre étude faite par R. Lakhal et D. Achoura al. [47] consiste à trouver une application possible et utile au laitier granulé de haut fourneau dans l'élaboration des bétons à hautes performances. L'objet de cette étude consiste à formuler des bétons à hautes performances par une substitution totale des fines de la fumée de silice par les fines de laitier granulé de l'usine d'EL HADJAR (Algérie).

Les essais à l'état frais montrent que le laitier granulé broyé offre une certaine maniabilité au béton, malgré la rétention d'eau par le laitier granulé est assez importante à raison de leur porosité.

R. Lakhal et al. [47] constatent que les bétons à hautes performances à base des fillers de laitier présentent des résistances un peu faibles aux jeunes âges, mais au cours de leurs cycles de durcissement, ils présentent des évolutions importantes des résistances surtout après 14 jours. Les résultats ainsi obtenus [47] montrent qu'on a pu atteindre des résistances très élevées et qui dépassent les 55 MPa à l'âge de 14 jours, et on a abouti à un béton à haute performance avec une résistance à 90 jours de l'ordre de 95 MPa pour la compression, et de 10 MPa à 28 jours pour la traction par flexion. Cette étude a considéré aussi le dosage optimal en laitier égal à 100 kg/ m³ (20% en poids de ciment).

I.7.4.3. CENDRES VOLANTES

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérage des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables.

Shi Hui-sheng et al. [48] ont travaillé sur l'influence de la cendre volante et du laitier à haut fourneau sur la résistance à la compression, la perméabilité du gaz, et à la carbonatation des bétons à hautes performances.

Ces chercheurs ont trouvé que ces ajouts ont une influence significative sur la résistance à la compression avec le rapport 'Eau/Liant' sélectionnés.

Toutefois, les auteurs [48] observent que la résistance à la compression du BHP avec du laitier de haut fourneau est plus élevée que celle du BHP avec la cendre volante ayant des mêmes rapports 'Eau/Liant' ($E/L=0,3$), cette élévation est attribuée à la réaction pouzzolanique élevée du laitier granulé de haut fourneau et leur grande finesse qui lui donne une très bonne capacité de remplissage.

Patel R et al. [49] ont observé une amélioration significative à long terme de la résistance à la compression, de la porosité et des propriétés de transport (diffusion et perméabilité) des BHP contenant 30% de cendres volantes. Cependant, leur effet sur la résistance en compression de BHP semble très tributaire du rapport 'E/L' utilisé [50].

Pour développer une réaction pouzzolanique, la cendre volante doit contenir une quantité non négligeable de matériaux vitreux ; de cet effet, il faut porter beaucoup d'attention et en ne se basant pas sur une généralisation de leurs efficacité quand elles sont utilisées comme ajouts dans les BHP.

D'une façon générale, l'introduction des cendres dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives. En fixant progressivement la chaux, la cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable.

Il est reconnu que l'emploi des ciments aux cendres volantes entraîne une diminution du retrait hydraulique et thermique du béton.

En plus des propriétés décrites, lorsqu'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces.

I.7.4.4. POUZZOLANE NATURELLE

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive, d'alumine et d'oxyde de fer [23].

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut, dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés : ajouts de produits chimiques, broyage à une finesse plus élevée et traitement thermique.

Une étude faite par R. Chaid et al. [51] concerne l'élaboration d'un BHP en incorporant de la pouzzolane naturelle locale de Béni-Saf (Algérie). Les résultats obtenus montrent que la substitution d'une partie du ciment par la pouzzolane contribue davantage aux caractéristiques physico-mécaniques et micro-structurales.

A 365 j de conservation, les chercheurs ont constatés un gain de résistance en compression de l'ordre de 38 %. Ce résultat était prévisible connaissant le rôle bénéfique de l'utilisation simultanée de la pouzzolane et d'un superplastifiant réducteur d'eau.

L'introduction de la pouzzolane conduit à une croissance appréciable des résistances, cela est due évidemment à son double rôle [51] :

- ✓ densification de la matrice par effet filler, grâce à la petitesse de ses particules ultrafines qui s'intercalent dans les pores créés par l'hydratation du ciment et entre le granulat et les produits d'hydratation (auréole de transition) ;
- ✓ précipitation des C-S-H de deuxième génération due à l'effet pouzzolanique, résultat de l'interaction de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libéré lors des réactions d'hydratation et les composants actifs de l'ajout.

R. Chaid et al. [51] ont aussi constaté que le retrait total des bétons à hautes performances avec ajout de pouzzolane est plus faible que celui mesuré sur le béton de contrôle, conséquence de la réduction de la quantité de ciment et du squelette cimentaire suffisamment rigide qui s'oppose aux déformations hydriques.

Ainsi, ces chercheurs ont constaté que les faibles déformations de fluage total du béton à haute performance de pouzzolane résultent du faible rapport 'E/L'. L'amplitude de fluage devrait être réduite par l'agglomération des fines de pouzzolane autour des anhydres qui empêchent l'hydratation dans les premiers jours après fabrication.

I.7.4.5. LES FILLERS

Un filler est dit siliceux s'il contient au moins 90% de silice et il est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les fillers se différencient les uns des autres par :

- ✚ Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent ;
- ✚ Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface ;
- ✚ Leur dureté, leur porosité.

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [52,53]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent par la suite moins significatifs.

Une recherche faite par Matiere et al. [38] pour la réalisation de bétons à hautes performances ayant une résistance à l'écrasement supérieure à 40 MPa (mesurée sur des éprouvettes 16 x 32 cm), où la fumée de silice est remplacée par un produit siliceux qui est plus facile à mettre en œuvre tout en apportant des avantages comparables.

Ce produit siliceux est constitué d'une poudre fine obtenue par simple désagrégation d'une diatomite naturelle prélevée en carrière, jusqu'à un degré de finesse compris entre 0,1 et 100 μm , et susceptible de remplacer une partie du ciment à résistance égale.

Or les essais conduits par cette étude ont montré que non seulement des diatomites naturelles permettaient d'obtenir des performances analogues à celles que donnait la fumée de silice, mais qu'en outre leurs qualités particulières apportaient d'autres avantages.

Aussi, l'étude montre que la diatomite apporte simultanément un effet mécanique d'amélioration du squelette granulométrique du mélange et un effet chimique de réaction pouzzolanique et permet d'obtenir une résistance à l'écrasement d'au moins 40 MPa à 28 jours.

Toutefois, cette étude [38] montre que de préférence pour l'obtention de bétons à hautes performances, une telle diatomite nécessitera un traitement de calcination à 400/500°C permettant d'activer la kaolinite contenue dans le matériau. Les chercheurs [38] ont constaté, cependant, que l'utilisation d'une telle diatomite sans traitement thermique permettait, dans une plage de dosage de 10 à 15 % du poids de ciment, des gains allant jusqu'à 100 % pour les résistances en compression à 24 heures.

Cette étude conclue que, généralement, la diatomite sera ajoutée au ciment pour l'obtention d'un mortier ou béton à hautes performances et le mélange sera additionné d'un fluidifiant tel qu'un sulfonate, par exemple dans une proportion d'environ 1 % du poids de ciment.

Les essais de cette recherche conclurent que la fumée de silice utilisée jusqu'à présent pour la réalisation des bétons à hautes performances pouvait être remplacée, avec des résultats comparables, par des diatomites naturelles, ayant subi une simple désagrégation.

La société ROCLAND [54] utilise des additifs pour béton qui permet d'améliorer la mise en œuvre pendant le coulage et d'améliorer les caractéristiques mécaniques du béton.

Parmi ces additifs : le Roc HP qui est un additif de masse à base de silice micronique qui permet de fabriquer des bétons de dallage à haute performance ayant une durabilité exceptionnelle.

Roc HP est composé de silice micronique et d'adjuvants spécifiques. Il est fortement recommandé d'utiliser des ciments Portland CPA-CEM I 52.5 PM ou PM ES, dont le dosage minimum sera de 350 kg/m^3 . Il permet la réalisation de dallages très cohésifs à l'état frais, qualité mise à profit pour le coulage de bétons fluides sans ségrégation [54].

Il augmente la compacité du béton durci grâce à la réactivité pouzzolanique. On réalise des bétons de très faible perméabilité au liquide et au gaz. Il permet l'obtention de bétons à résistance mécanique élevée [54].

L'addition de Roc HP permet d'accroître les résistances mécaniques en compression et en traction, le module d'élasticité et permet de diminuer le retrait à long terme et le fluage des bétons à hautes résistances de béton classique [54].

I.7.4.6. LA POUSSIÈRE

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm^2/g .

Une étude récente faite par Nuno Almeida et al. [55] a été effectuée à la Technical University de Lisbonne - IST (Portugal) visant à évaluer la possibilité de l'incorporation de la poussière d'une pierre au béton à haute performance.

La poussière choisie pour ces études est de couleur blanche claire (origine du calcaire et de marbre).

Les résultats de cette étude ont montré que la substitution de 5% du sable par la poussière donne une plus haute résistance à la compression, une résistance à la traction par fendage plus élevée, un module d'élasticité supérieur et améliore les propriétés liées à la durabilité.

Nuno Almeida et al. [55] ont observé que l'incorporation de 0% à 10% de la poussière a augmenté la densité de béton en comparaison avec un mélange témoin; cette augmentation peut être expliquée par la diminution du rapport 'E/C'.

I.7.5. SUPERPLASTIFIANT

Le développement spectaculaire de la résistance à la compression est reliée directement à un nombre de technologies récentes, en particulier la découverte de l'extraordinaire action de dispersion des superplastifiants avec lesquels il est devenu très possible de confectionner des bétons avec des faibles rapports 'E/C' [56]; d'autre part, la substitution partielle d'une quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts cimentaires [9].

L'apparition des bétons à hautes performances est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP) [57,58] qui ont créé la base du développement des bétons à hautes performances.

Ces adjuvants ont pour effet de transformer un béton ferme en une suspension fluide. On les utilise donc pour amoindrir la quantité d'eau de gâchage, en conservant au mélange sa maniabilité qui lui permet sa mise en œuvre par les méthodes usuelles.

I.7.5.1. MÉCANISME D'ACTION

Les superplastifiants agissent par adsorption à l'interface solide-eau, ce qui permet aux grains de ciment d'acquiescer des charges identiques et créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Ceci permet de libérer une partie de l'eau qui a été piégée par les grains de ciment flocculés et diminue ainsi les frictions intergranulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton.

Cette quantité d'eau piégée est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange. Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport 'E/C', faciles à mettre en place [58].

Les plastifiants et les superplastifiants vont jouer le rôle de dispersants qui permettent de défloculer les grains fins qui se trouvent en suspension dans l'eau de gâchage. Ces grains fins peuvent aussi être des grains de fillers, d'addition de sable fin naturel ou concassé etc. Cette

dispersion aura donc pour effet une diminution de la quantité d'eau de gâchage du béton en vue d'obtenir un affaissement donné [59].

Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues.

Grâce à cette découverte, il est maintenant possible de fabriquer des bétons fluides qui contiennent seulement la quantité d'eau nécessaire pour hydrater les grains de ciment [60]. Elle permet de réduire la teneur en eau jusqu'à 30% [61] (utilisation d'un super réducteur d'eau), c'est-à-dire trois ou quatre fois plus qu'un réducteur d'eau normal. Cela permet d'éviter ainsi l'eau qui ne participe jamais à l'hydratation du ciment et qui affaiblit la structure durcie du béton et augmente sa porosité [60].

L'utilisation de superplastifiant dont l'action est schématisée sur la figure I.5 [62] permet de privilégier soit l'action « réduction d'eau » ou « l'effet fluidification » ou bien les deux, ensemble.

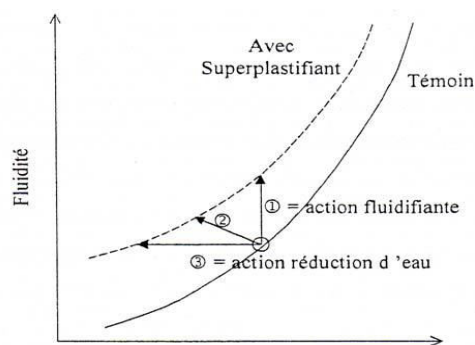


Figure I.5. Utilisations d'un superplastifiant [62]

- Augmentation de la fluidité à teneur en eau égale
- Diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité
- Diminution de la teneur en eau à fluidité égale.

I.7.5.2. INFLUENCE DU DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT ET LE MODE D'INCORPORATION

Le superplastifiant provoque un retard d'hydratation du ciment, donc un ralentissement de la chaleur d'hydratation et une augmentation de la durée de prise [63]. Cet effet retardateur du superplastifiant s'améliore avec l'augmentation de la concentration en superplastifiant.

Paillère et al. [64] ont pu mettre en évidence trois plages de dosages en superplastifiant qui influent sur le maintien de la maniabilité du BHP :

- ♦ Une plage de faibles pourcentages de superplastifiant inférieurs à 1 % d'extrait sec présentant presque 5 % du produit commercialisé. Dans ce cas le maintien de maniabilité est fluide, sa durée est de l'ordre de 15 mn.
- ♦ Une plage de pourcentages élevés en superplastifiant, dosage compris entre 1 % et 3 % en extrait sec surtout avec des additions de fumée de silice, où on a pu constater un phénomène de refluidification qui passe par un dosage optimal en adjuvant à partir duquel on assiste à une décroissance de la durée de maniabilité.

- ♦ Une plage de pourcentages très élevées supérieures à 3 % et plus en extrait sec où on a remarqué une perte pratiquement immédiate de la maniabilité.

Cependant, la majorité des utilisateurs d'adjuvants commerciaux se contentent, dans les applications industrielles, de pourcentages en superplastifiant inférieurs à 1 % d'extrait sec, pour les BHP ; ils peuvent aller jusqu'à 1.5 %.

Le mode d'incorporation du superplastifiant peut également influencer sur la fluidité des pâtes de ciment. L'efficacité du superplastifiant est souvent accentuée lorsque celui-ci est additionné d'une manière différée [65,66] ou fractionnée de telle façon qu'on introduit 1/3 du superplastifiant dans l'eau de gâchage et la fraction restante (2/3) sera ajoutée à la fin du malaxage [64,67].

Paillère et al. [64] et Aitcin et al. [68] ont montré l'avantage de l'addition fractionnée du superplastifiant : une fraction dans l'eau de gâchage, l'adjuvant jouant son rôle de plastifiant-réducteur d'eau alors que la fraction restante à la fin du malaxage joue le rôle de fluidifiant.

En revanche, une attention particulière doit être apportée à la compatibilité ciment superplastifiant, car les différents ciments Portland ne se comportent pas de la même façon avec tous les superplastifiants [69].

I.8. CARACTÉRISATION DES BÉTONS Á HAUTES PERFORMANCES

L'expression « béton à hautes performances » recouvre une vaste gamme de bétons dont les caractéristiques et les propriétés différentes sensiblement.

I.8.1. CARACTÉRISTIQUES RHÉOLOGIQUES DES BHP

Il est nécessaire de connaître le comportement du BHP à l'état frais afin de faciliter sa mise en moule, surtout que sa mise en œuvre est envisagée sous forme de préfabriqués plutôt que le coulage sur chantier. C'est ce qu'on appelle : la rhéologie du matériau à l'état frais.

Le terme rhéologie vient du mot grec Rhéon : s'écouler, et signifie mesure de l'écoulement. Ce terme est apparu en 1928. La rhéologie étudie donc l'écoulement des fluides ou encore les déformations des solides sous l'effet des contraintes appliquées. Elle sert à connaître les lois d'évolution des matériaux, et à prévoir leur comportement.

La rhéologie des matériaux s'est développée tardivement du fait que certains matériaux ne pouvaient s'inscrire dans l'une des deux catégories traditionnelles : fluide ou solide. Parmi ces matériaux : le béton à l'état frais [70].

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique.

Ferraris [71] déclare que les mesures rhéologiques sont délicates à réaliser dans le cas des bétons, du fait de l'étendue des tailles des particules qui les composent (de 1 μm à 15 mm voire 20). Ces mesures montrent que ces matériaux ne sont pas des fluides newtoniens, mais qu'ils présentent un comportement viscoplastique [72,73].

Le matériau ne peut s'écouler que lorsque son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement, τ_0 (Figure I.6).

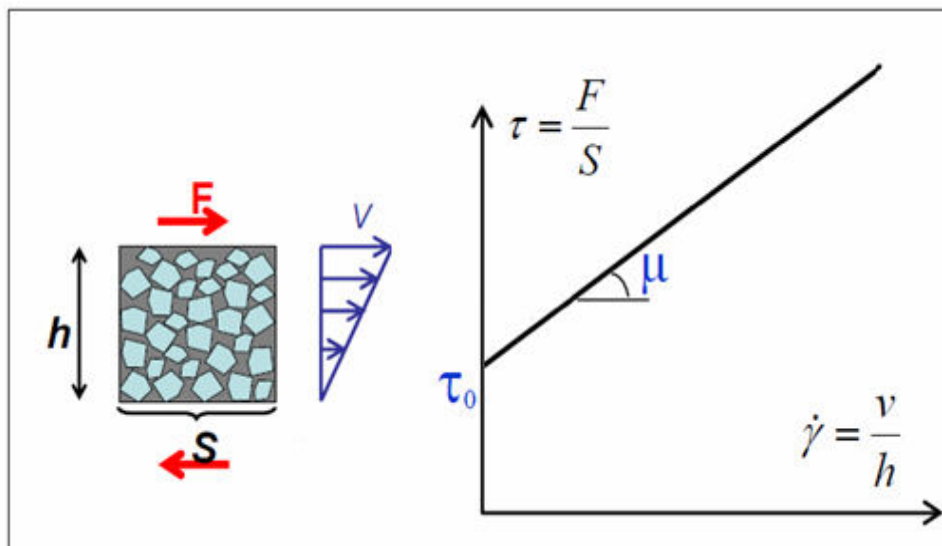


Figure I.6. Comportement rhéologique du BHP [74].

La rhéologie du BHP est essentiellement gouvernée par des facteurs physiques et chimiques. Parmi les facteurs physiques qui jouent un rôle important sur la rhéologie du béton frais, on retrouve la répartition granulométrique et la forme de granulats de même que la distribution granulométrique et la forme des grains de ciment [9].

Parmi les facteurs chimiques qui affectent la rhéologie des bétons frais, il y a la réactivité initiale du ciment et des ajouts cimentaires lorsqu'ils entrent en contact avec l'eau et la durée de ce que l'appelle la période dormante.

Il y a aussi les conditions d'opération des malaxeurs, leur efficacité, particulièrement en ce qui a trait au cisaillement, la température du BHP frais une fois qu'il a été malaxé et la température ambiante.

L'étude de J.Yamine [75] a montré qu'il était possible de formuler un BHP avec des propriétés rhéologiques auto-plaçantes en combinant une optimisation de la distribution granulaire et l'utilisation d'adjuvants spécifiques. L'objectif de cette étude était de concilier les propriétés des BHP à l'état durci avec les propriétés rhéologiques des BAP à l'état frais ; c'est-à-dire arriver à des formulations de BHP-AP.

Les BHP présentent une bonne ouvrabilité liée aux superplastifiants entrant dans sa composition. Ils présentent aussi: une bonne stabilité à l'état frais, ce qui garantit l'absence de ségrégation et une faible viscosité, qui autorise le pompage sur de longues distances [17].

I.8.2. CARACTÉRISTIQUES DES BHP À L'ÉTAT DURCI

I.8.2.1. RÉSISTANCE EN COMPRESSION

C'est la plus importante des propriétés d'usage du matériau. C'est aussi celle dont l'amélioration est la plus spectaculaire.

Néanmoins, la résistance mécanique est généralement une caractéristique souvent utilisée pour classer les BHP et un avantage majeur de ces bétons par l'obtention de hautes résistances.

Le béton à haute performance est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais, à court ou à long terme.

Il a d'abord été utilisé pour sa haute résistance. Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté [17]. Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours).

I.8.2.2. RÉSISTANCE EN TRACTION

Généralement, la résistance à la traction du béton est liée à la résistance à la compression, et elle peut être obtenue par deux méthodes : la traction par fendage et la traction par flexion. Les deux méthodes mesurent la résistance à la traction d'une manière indirecte.

Dans le cas des BHP, les mesures de la résistance au fendage ne présentent pas de difficulté spéciale et l'on peut utiliser les mêmes montages et les mêmes procédures que dans le cas des bétons usuels.

La résistance à la traction par fendage du béton croît avec celle à la compression, mais elle ne s'améliore pas dans les mêmes proportions que celle à la compression pour des bétons à hautes performances.

En effet, la résistance du BHP en traction croît sensiblement par rapport au béton ordinaire. Cependant, elle croît moins rapidement que la résistance en compression [76].

La faible résistance à la traction est la seule critique des BHP, mais elle est à peine un peu plus élevée que celle des bétons usuels.

I.8.2.3. POROSITÉ

La porosité est un paramètre essentiel pour la durabilité des matériaux à base cimentaire car la taille des pores et leur connectivité déterminent la résistance du matériau à la pénétration d'agents agressifs.

Une étude de la porosité par intrusion au mercure montre peu de pores capillaires dans les BHP. Cette faible porosité impose une diffusion très lente des molécules ou des ions traversant le matériau, ce qui a été montré par l'étude très complète de Roux comparant les performances d'un BHP à celles d'un béton conventionnel [77].

Une autre étude a été menée sur des bétons à base de fumée de silice ; l'auteur de celle-ci a mesuré la porosité à l'aide d'un porosimètre à mercure et l'a comparé à la porosité d'un béton normal (Figure I.7). Le volume total de mercure introduit sous la pression de 150 MPa est réduit de moitié dans les bétons de hautes performances par rapport au béton ordinaire.

Deux facteurs interviennent ici dans la réduction de la porosité [40] :

- La présence de la fumée de silice, filler pouzzolanique;
- L'utilisation d'un fluidifiant réduisant le rapport 'E/C' de 0,56 à 0,21.

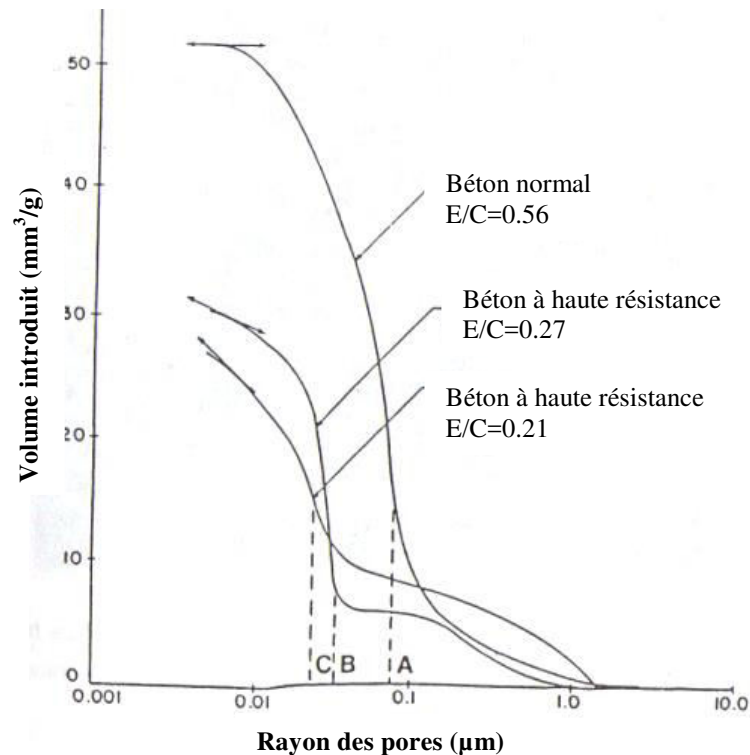


Figure I.7. Courbes de porosité au mercure de BHP et d'un béton normal [40]

Le rapport 'E/C' est le paramètre de premier ordre pour la porosité capillaire du béton et son interconnexion [78]. Pour un rapport 'E/C' inférieur à 0,4, correspondant au domaine des BHP, la porosité est extrêmement réduite du fait de leur très faible teneur en eau et de leur granulométrie comportant des éléments fins en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

I.8.2.4. PERMÉABILITÉ

Les trois principaux fluides qui peuvent pénétrer dans le béton et mettre en cause sa durabilité sont: l'eau, pure ou contenant des ions agressifs, le gaz carbonique et l'oxygène. Ils peuvent se déplacer au travers du béton de différentes manières, mais tous les mouvements dépendent principalement de la structure de la pâte de ciment.

La perméabilité concerne l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux. Cependant, le mouvement des différents fluides dans le béton ne se fait pas seulement par écoulement à travers le réseau poreux, mais aussi par des mécanismes de diffusion et d'absorption.

La perméabilité qui contrôle les transferts des fluides. Cette propriété est fonction de la microstructure du matériau, caractérisée par la porosité, la distribution des tailles de pores, la densité et l'ouverture des fissures

La réduction du rapport 'E/C' permet non seulement de diminuer le volume total des pores capillaires mais elle permet aussi de réduire leur diamètre [79].

En général, il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les plus petits possibles car le degré d'interconnexion y est plus faible. La perméabilité de la pâte

s'en trouve alors considérablement diminuée car il y a très peu de chemins préférentiels pour le passage des liquides, des gaz ou des ions potentiellement agressifs [79].

En effet, le transport des espèces chimiques étant dû à des différences de concentration et non de pression, il s'apparenterait davantage à la diffusion. Mais les essais de perméabilité peuvent fournir des renseignements intéressants dans la mesure où ils renseignent sur le degré de facilité qu'aura le dioxygène de l'air à parvenir jusqu'aux armatures susceptibles de se corroder [80].

La perméabilité d'un BHP est considérablement plus faible, pratiquement impossible à mesurer selon Torrent et Jornet [81], sauf si l'on recourt à la mesure de la « perméabilité » dite aux ions chlore selon la norme [ASTM C].

Un béton qui a un rapport 'Eau/Liant' de 0,45 a une « perméabilité aux ions chlore » qui varie entre 3000 et 5000 coulombs, alors qu'elle n'est que de 100 à 500 coulombs pour un BHP qui contient de la fumée de silice et qui a un rapport 'Eau/Liant' inférieur à 0,25 [39].

Cette très faible « perméabilité aux ions chlore » des BHP indique qu'il existe encore un réseau de capillaires très fins interconnectés, mais que ces capillaires sont suffisamment fins pour que l'eau ne s'y écoule pas d'elle-même [39].

I.8.2.5. MODULE D'ÉLASTICITÉ (EN COMPRESSION)

Le BHP a été défini comme un béton ayant une grande durabilité du fait du faible rapport 'Eau/Ciment'. Ce dernier a un effet dominant, non seulement sur la résistance mécanique du matériau, mais aussi sur la forme et la taille du réseau poreux [82], le module élastique, la perméabilité [83], la diffusion et autres propriétés du béton.

Etant donné la grande compacité des BHP et la très faible proportion de vides, le module d'élasticité des BHP est nettement plus élevé que pour les bétons traditionnels, pour ces derniers le BAEL 91 indique la formule approximative suivante [13] :

$$E_i = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}} \quad (I-1)$$

Il semble que cette formule peut encore s'appliquer aux bétons à hautes performances [29].

Par conséquent, la relation entre le module d'élasticité d'un BHP et sa résistance à la compression est moins régulière que dans le cas d'un béton ordinaire, cela est vrai quelle que soit la relation utilisée [31].

En conséquence, lors de la conception de structures, le module d'élasticité d'un BHP ne devrait pas être supposé comme une simple fonction de la résistance à la compression [31].

Paultre et al. [84] ont fait des tests comparant le BHP avec un autre béton qui est le béton autoplaçant. Ils ont effectué des essais de compression (pour déterminer la résistance à la compression et le module d'élasticité) sur un BHP à affaissement plus faible et un BAP mais ayant une résistance mécanique égale. Les résistances en compression des BHP et des BAP sont comparables, par contre les modules d'élasticité sont élevés pour les BHP, comme on peut l'observer sur les résultats de ces essais, consignés dans le tableau I.4 suivant :

Tableau I.4. Principales caractéristiques des bétons testés par Paultre et al. [84]

Nature du béton	BHP	BAP	BHP	BAP
Résistance visée (MPa)	60	60	80	80
Rapport E/L	0.42	0.5	0.37	0.35
Rc28 (MPa)	60	54.1	80.9	71.9
Module d'élasticité (GPa)	38	34.7	40.9	38.7

I.8.2.6. RÉSISTANCE AU FEU

Même si la durabilité du BHP est en règle générale nettement supérieure à celle du béton conventionnel, la résistance au feu est cependant un élément sur lequel il convient d'attirer l'attention. En raison de la structure très dense des pores, la pression de vapeur, qui apparaît à l'intérieur du béton à des températures excédant 100°C, peut difficilement être réduite. La vapeur ne peut en effet pas être rapidement évacuée à l'extérieur, en raison de la structure très dense du matériau. Par rapport au béton conventionnel, la résistance du béton à haute résistance diminuera dès lors plus rapidement si la température est supérieure à 100 °C [85].

La fumée de silice assure d'une part le remplissage des vides entre les grains du ciment et d'autre part, grâce à ses propriétés pouzzolaniques, elle fait prise en constituant avec le ciment une matrice plus compacte que celle d'un béton ordinaire. Cependant, cette faible porosité peut générer des problèmes sur ces bétons lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées.

Des études récentes montrent que l'exposition des grandes éprouvettes en béton à un incendie mène à l'explosion et à la ruine complète de la structure alors que d'autres observent que le béton n'a quasiment pas été endommagé [85].

En effet, le BHP peut présenter un comportement critique à haute température, encore difficile à prédire. L'éclatement se produit généralement à des températures comprises entre 250°C et 400°C. L'enjeu est de comprendre les phénomènes thermo-physiques qui interviennent lorsque le béton est soumis à hautes températures [85].

I.8.2.7. RETRAIT ET FLUAGE

Les bétons à hautes performances et très hautes performances sont souvent utilisés pour des éléments de structure sollicités en compression ou des ouvrages précontraints pour lesquels la connaissance du comportement différé est de la plus haute importance [86].

La possibilité de charger le béton à un âge précoce constitue un avantage économique essentiel pour les BHP et les BTHP, compte tenu des hautes résistances atteintes dès quelques heures ou quelques jours. Cette possibilité implique néanmoins de maîtriser des déformations différées des redistributions d'efforts, qui peuvent être importantes. L'amplitude des déformations différées des BHP et BTHP peut être considérée comme sensiblement inférieure à celle des bétons ordinaires [87], sauf pour le retrait endogène qu'il se développe plus rapidement pour un rapport 'E/C' plus faible [88].

L'existence du retrait endogène (appelé aussi retrait d'autodessiccation) a été reconnue dès 1934 dans des bétons ayant des rapports 'Eau/Ciment' élevés, mais, comme ce retrait était très faible (50 à 100 millièmes), il a été négligé. Cette forme particulière de retrait (sans perte

de masse) est devenue très importante avec l'arrivée des BHP qui peuvent avoir un retrait endogène aussi important que leur retrait de séchage.

L'équipe de P.C Aitcin [89] a montré que la méthode actuelle de mesure de retrait que l'on retrouve dans les normes [ASTM] est totalement inadaptée pour mesurer le retrait des BHP où il faut commencer à mesurer le retrait avant la prise du béton.

L'équipe a aussi montré qu'un béton mûri sous l'eau, quel que soit son rapport 'Eau/Liant', ne subit pas de retrait, mais gonfle plutôt. Par ailleurs, il semble qu'un rapport 'Eau/Ciment' égal à 0,35 minimiserait le retrait total. Il est absolument impératif d'en arriver à contrôler le retrait endogène des BHP si l'on veut les utiliser de façon efficace pour construire des structures durables [89].

Par contre, il est très important de laisser se développer un retrait endogène résiduel après quelques jours de murissement à l'eau, de façon à former des ménisques à l'intérieur de la pâte de ciment hydraté pour diminuer la perméabilité et l'absorptivité du BHP et, par voie de conséquence, la pénétration des agents agressifs [90].

Le fluage du béton à hautes performances est fréquemment inférieur au fluage observé pour un béton de résistance conventionnelle. L'âge du béton au moment de la sollicitation est également extrêmement important pour le BHP. Lorsque la charge est exercée sur un béton jeune, la déformation par fluage sera plus importante que dans le cas d'un béton plus âgé. Il en va de même en ce qui concerne le béton conventionnel [18].

Enfin, le fluage ainsi que le retrait de dessiccation de BHP avec fumée de silice sont considérablement réduits [91]. En revanche, le retrait d'auto-dessiccation (retrait endogène) est amplifié du fait de l'augmentation de la pression capillaire due à la porosité fine des BHP incorporant de la fumée de silice [69].

I.8.2.8. DURABILITÉ

La durabilité est tout aussi une propriété particulièrement intéressante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau béton. Elle s'explique, en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons [92].

La durabilité des matériaux de construction est un problème très important qui dépend en grande partie de leur exposition à différentes conditions climatiques. Les recherches sur le comportement au stress des matériaux individuels constituent une bonne base d'évaluation de la durée de vie d'ouvrages comme les routes, les ponts, les tunnels et les édifices civils en général.

Des études sur les BHP indiquent que ces bétons ont une durabilité " potentielle " élevée et, en particulier, une très bonne résistance aux agents agressifs d'origine externe (la pénétration des chlorures et la carbonatation sont limitées à une zone très superficielle) et interne. Le meilleur comportement des BHP fournit des arguments solides pour prescrire des BHP en vue d'assurer une durée de vie plus longue aux ouvrages en béton armé (ou précontraint) et/ou éviter bon nombre de pathologies (alcali-réaction, lixiviation par les liquides chimiquement agressifs, etc.) [93].

La durabilité des BHP résulte de leur forte compacité et de leur très faible porosité extrême.

Cette dernière et la perméabilité de ces bétons améliorent par ailleurs la durabilité. Il en est de même pour la résistance aux agressions chimiques comme celles que peuvent subir les bétons en milieu marin ou en milieu agressif et la résistance au gel. La résistance aux agents agressifs (ions chlore, sulfates, eau de mer, acides, ...), le faible risque de corrosion des armatures, la forte résistance au cycle gel-dégel et à l'écaillage ainsi que la faible perméabilité sont autant de propriétés qui qualifient ce béton comme étant une réponse favorable aux exigences de durabilité.

Pour réaliser un béton durable, il suffit, dans la majorité des cas, de réaliser un béton suffisamment dosé en ciment et très compact. Le respect d'exigences supplémentaires, notamment le choix du ciment, est nécessaire pour maîtriser des situations plus sévères, telle qu'une conservation en milieu chimique agressif (eau de mer, eau séléniteuse, nitrate d'ammonium etc.) éventuellement couplée à une température de climat chaud [94].

Pour évaluer la durabilité « potentielle » d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations.

La durabilité constitue l'une des préoccupations essentielles dans la conception, la réalisation et la maintenance des ouvrages de génie civil. Parmi les maladies des ouvrages, la corrosion des armatures qui est la principale cause de dégradation des structures en béton armé et la plus importante en termes de maintenance, les chocs abrasions érosions, la fissuration et un gonflement...etc. (Figure I.8).

En particulier, la fabrication de béton à haute performance met en jeu une combinaison de béton ultra résistant et de sous-produits industriels ainsi que de mélanges tels que les fumées de silices ou les cendres volantes. Cela permet d'utiliser le BHP en tant que matériau de structure au-delà de ses limites naturelles, ce qui rend la prédiction de sa durée de vie très difficile.

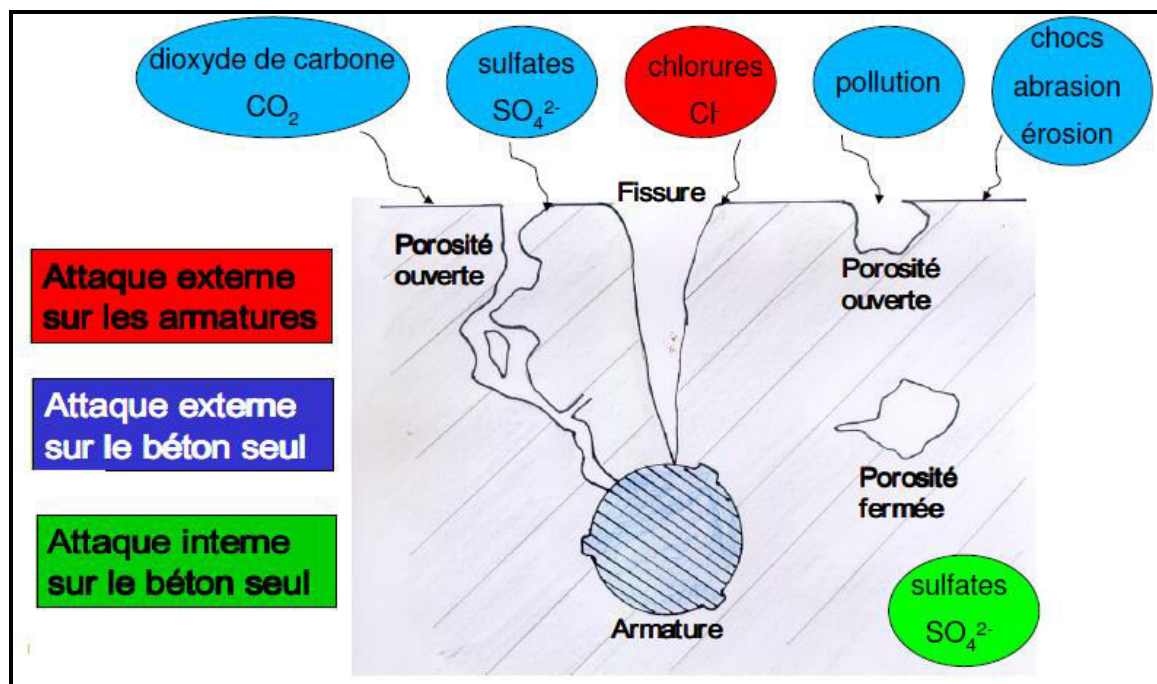


Figure I.8. Principales agressions et attaques du béton [95].

I.8.2.8.1. FACTEURS AFFECTANT LA DURABILITÉ DU BÉTON

Les propriétés du béton ont une influence directe sur la durabilité de l'ouvrage. Pour fabriquer un ouvrage durable, il faut donc utiliser un matériau durable.

Les caractéristiques du béton qui contrôlent sa durabilité peuvent être regroupées en :

- ✚ Le choix des matériaux ;
- ✚ La formulation du béton ;
- ✚ La cure du béton ;
- ✚ Facteurs liés à la mise en œuvre de l'ouvrage ;
- ✚ Facteurs liés à la conception de l'ouvrage ;
- ✚ Facteurs climatiques et environnementaux.

I.8.2.8.2. PHÉNOMÈNES INFLUENTS SUR LA DURABILITÉ

Les principaux processus chimiques à la base des dégradations du béton sont généralement regroupés en trois catégories.

- ✚ L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates ;
- ✚ Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif ;
- ✚ La formation des nouveaux produits (généralement expansifs).

Compte tenu des multiplicités des types d'agressions chimiques d'une part, et des similitudes des dégradations constatées d'autre part, il est souvent très difficile d'établir un diagnostic simple et univoque. Mais malgré ces similitudes, on peut distinguer les attaques chimiques d'après les manifestations et les caractéristiques de chaque attaque (Figure I.9) : la corrosion par exemple est induite soit par la carbonatation, soit par la pénétration des ions chlorure, et dans la plupart du temps on peut différencier entre les deux par l'éclatement : s'il est local, on parle des ions chlorures mais s'il est général c'est une carbonatation. Même les autres attaques telles que la réaction alcali-granulat (due aux granulats réactifs), l'attaque par les acides, par les sulfates et par l'eau de mer engendrent une fissuration et un gonflement mais chaque attaque a ses conséquences et ses manifestations qui la caractérisent. Donc la connaissance du milieu ou de l'environnement où se trouve l'ouvrage participe à connaître l'attaque.

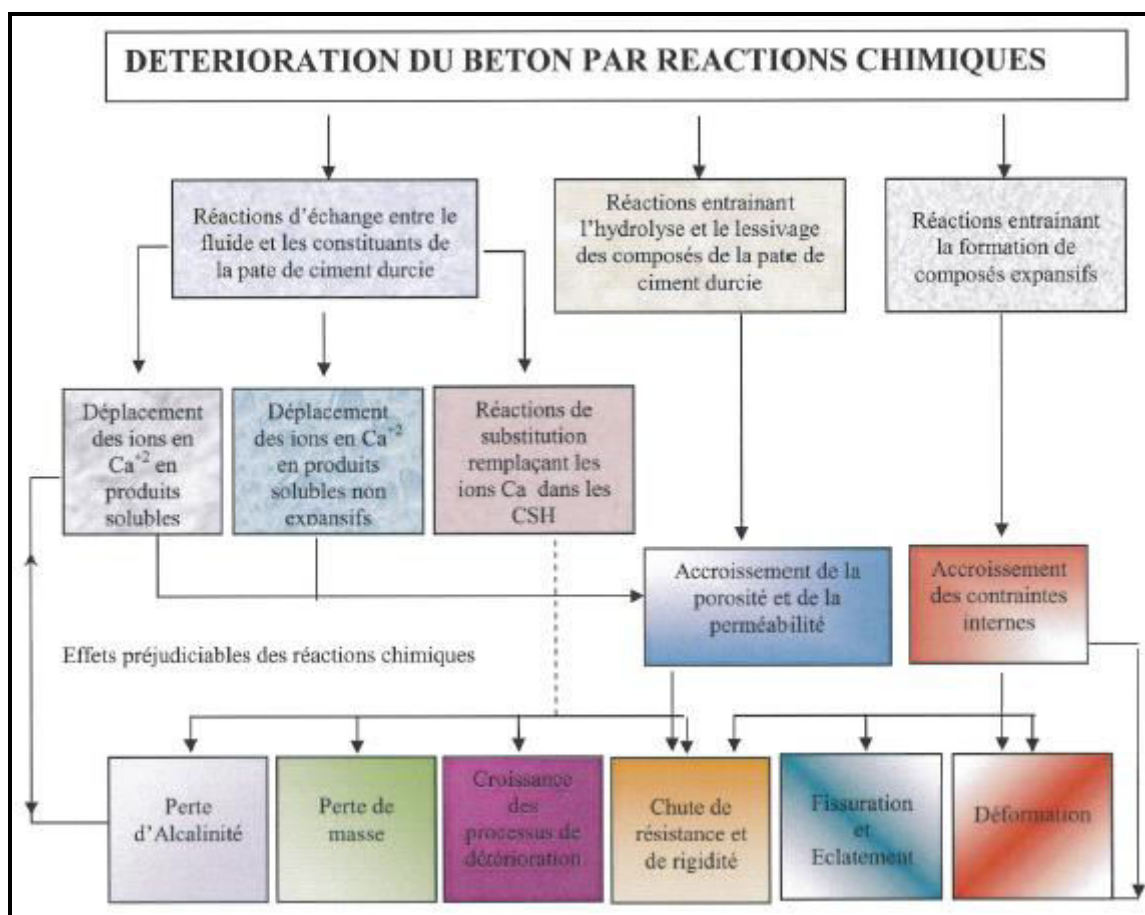


Figure I.9. Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques [94]

I.9. FORMULATION DES BÉTONS À HAUTES PERFORMANCES

L'objectif de toutes les méthodes de formulation des bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible [9]. En règle générale, une méthode de formulation permet aussi de calculer un mélange de départ que l'on pourra plus ou moins modifier pour obtenir les propriétés désirées à partir de quelques gâchées d'essai. Par ailleurs, le problème de la formulation des bétons s'est singulièrement compliqué dans les années récentes du fait de nouveaux constituants tels que les adjuvants organiques et les additions minérales.

La formulation des bétons à hautes performances est une opération plus complexe que celle des bétons classiques parce que les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Par ailleurs ces matériaux sont formulés en utilisant largement des sous-produits industriels (fumée de silice, laitiers de hauts fourneaux, cendres volantes, etc.), et sont souvent en substitution de ciment.

Les aspects d'une formule de béton secs les plus communément étudiés sont la maniabilité et la résistance en compression.

La résistance du béton est liée à sa porosité et à la distribution des pores capillaires. La recherche des hautes performances passe donc par la réduction de la porosité du béton.

L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste donc à [96] :

- ☛ Diminuer la porosité (pourcentage de vide) de la matrice cimentaire ;

☞ Optimiser le squelette granulaire (granulométrie adaptée et ajouts d'éléments fins).

Pour diminuer la porosité, il faut :

- ◆ Réduire le rapport 'E/C' (de l'ordre de 0,3 à 0,35) ;
- ◆ Fluidifier le mélange en défloculants ("en cassant les grumeaux") les grains de ciments à l'aide de superplastifiants (l'emploi de superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale).

Pour optimiser le squelette granulaire, il faut :

- ◆ Introduire des ultrafines qui comblent les microvides intergranulaires, et améliorent la fluidité à l'état frais ;
- ◆ Adapter chaque classe granulaire (4 niveaux de taille de grains) afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (granulométrie comprenant des éléments fins pour remplir les espaces entre les plus gros granulats) ;
- ◆ Déterminer la distribution de taille des grains, la forme et la résistance des grains les mieux adaptés.

I.9.1. MÉTHODE DE FORMULATION DE L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE (UTILISÉE DANS CETTE ÉTUDE)

Cette méthode très simple suit la même approche que la norme [ACI 211-1]. Il s'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basée sur la méthode des volumes absolus [9].

L'organigramme de cette méthode est présenté par la figure I.10.

La méthode de formulation développée à l'Université de Sherbrooke permet de formuler un BHP avec une procédure basée sur le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés :

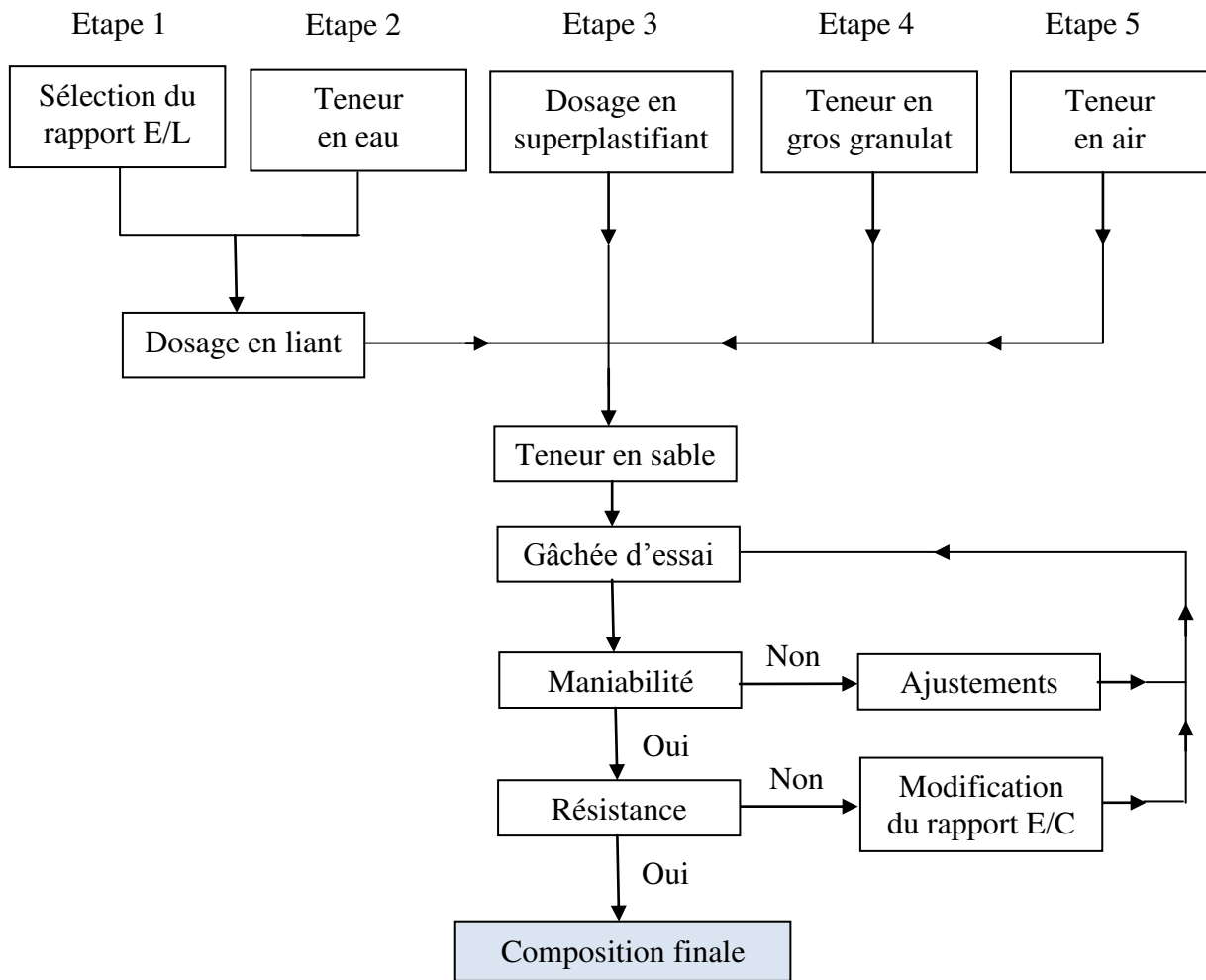


Figure I.10. Organigramme de la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke proposée pour formuler des BHP [9].

✓ **Le rapport 'E/L' :**

La résistance des bétons croît en raison inverse du rapport 'E/C' (eau efficace /ciment). On peut trouver le rapport 'Eau/Liant' en utilisant la figure I.11 pour une résistance à la compression à 28 jours donnée (la résistance à la compression est mesurées sur des cylindres de 100×200 mm). Le fuseau de la figure I-11 donne une gamme relativement étendue de rapport 'Eau/Ciment' pour une résistance donnée.

On peut commencer par prendre la valeur moyenne donnée par ce fuseau si l'on ne connaît pas l'efficacité du liant que l'on utilise.

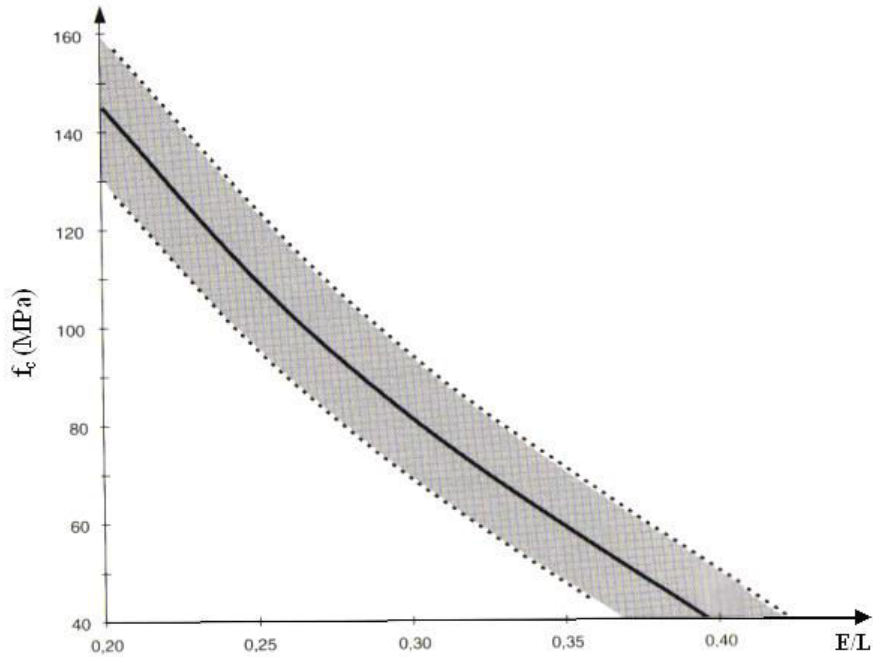


Figure I.11. Relation proposée entre le rapport ‘E/L’ et la résistance à la compression [9].

✓ **Dosage en eau :**

La figure I.12 présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. La dose de saturation correspond à la quantité de superplastifiant, incorporée au mélange, qui au-delà de laquelle il n’y aura plus l’effet fluidifiant supplémentaire. La détermination de cette dose se fait habituellement par la méthode des coulis au moyen du cône de Marsh.

On peut ajouter 5 l/m³ à toutes les valeurs présentées à la figure I.12. Lorsque le point de saturation du superplastifiant n’est pas connu, on suggère de commencer avec une quantité d’eau de malaxage égale à 145 l/m³.

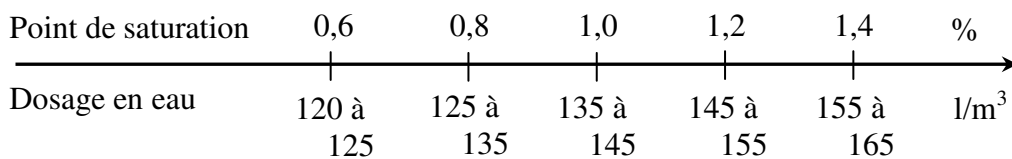


Figure I.12. Détermination du dosage en eau [9].

✓ **Dosage en superplastifiant :**

Pour un rapport ‘E/C’ inférieur à 0,4, correspondant au domaine des BHP, la résistance prévisible dépasse alors 50 MPa. Cependant, le mélange devient dans la pratique plus difficile à réaliser car il n’y a plus assez d’eau pour assurer la fluidité. La solution consiste à défloculer le ciment par l’utilisation des superplastifiants.

Le dosage en superplastifiant se déduit du dosage au point de saturation. Si l’on ne connaît pas le point de saturation, on peut toujours commencer avec un dosage en superplastifiant égal à 1 %.

✓ **Dosage en gros granulat :**

Le dosage en gros granulats peut être déduit de la figure I.13 en fonction de la forme des granulats. S'il ya quelques doutes sur la forme des granulats ou si on ne la connaît pas, on peut toujours commencer avec une quantité de gros granulats de 1000 kg/m^3 .

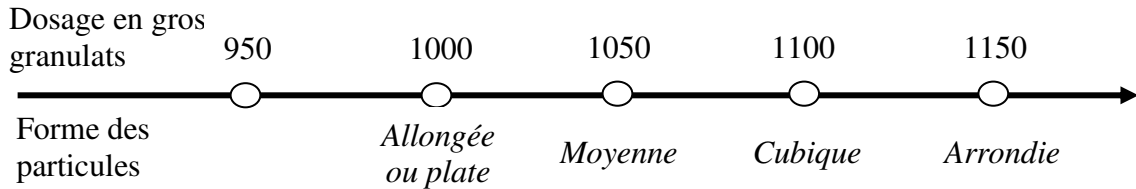


Figure I.13. Dosage en gros granulat [9].

✓ **Teneur en air :**

La seule quantité d'air que l'on retrouvera dans les BHP est le volume d'air piégé. Cependant, de façon à améliorer la manipulation et la mise en place des BHP, certains auteurs suggèrent de rajouter systématiquement une très faible quantité d'air entraîné dans le BHP.

Par conséquent, certains auteurs suggèrent d'utiliser une valeur de 1,5 % comme valeurs initiale de la quantité d'air piégé et d'ajuster les résultats par la suite en fonction de ce qui est obtenu lors des gâchées d'essai.

I.9.2. AUTRES MÉTHODES DE FORMULATION

Bien que les méthodes de formulation des BHP relèvent encore plus d'un art que d'une science, il est certain qu'elles reposent aussi sur des principes scientifiques qui sont à la base de toutes les formulations de béton [9]. A ce titre il y a lieu de présenter quelques méthodes de formulation.

I.9.2.1. MÉTHODE SUGGÉRÉ PAR LA COMITÉ ACI 363

La méthode suggérée par le comité [ACI 363] sur les bétons à hautes performances comporte neuf étapes [9] :

- ✚ Affaissement et choix de la résistance nécessaire ;
- ✚ Sélection de la taille maximale du gros granulat ;
- ✚ Sélection de la quantité de gros granulat ;
- ✚ Estimation de la quantité d'eau libre et de la teneur en air ;
- ✚ Sélection du rapport 'Eau/Liant' ;
- ✚ Teneur en ciment ;
- ✚ Premier essai avec le ciment ;
- ✚ Autres gâchées d'essai avec des variations du volume de ciment ;
- ✚ Gâchée d'essai ;

I.9.2.2. MÉTHODE DES COULIS DU LCPC

La méthode des coulis de De Larrard [97] permet d'optimiser le dosage en superplastifiant. Le principe de la méthode consiste à mesurer la rapidité d'écoulement du coulis sous l'effet de son propre poids à travers un ajutage. Plus l'écoulement sera rapide est plus le coulis sera réputé fluide.

L'idée principale de cette méthode est d'effectuer plusieurs essais sur des coulis afin d'étudier leur rhéologie et sur des mortiers pour étudier leurs propriétés mécaniques.

Cette méthode est basée sur deux utilités semi-empiriques. La résistance à la compression du BHP est prédite par une formule qui est en fait une extension de la formule originale de Féret dans laquelle on utilise un certain nombre de paramètres et la maniabilité de ce béton qui est reliée à la viscosité du mélange qui est calculé d'après le modèle de Farris.

I.9.2.3. MÉTHODE SIMPLIFIÉE DE MEHTA ET AÏTCIN

Mehta et Aïtcin [98] ont proposé une version simplifiée de la procédure permettant de formuler un BHP qui s'applique à des bétons de masse volumique normale ayant des résistances à la compression comprises entre 60 et 120 MPa. Cette méthode peut être utilisée avec de gros granulats qui ont une taille maximale comprise entre 10 et 15 mm et des affaissements comprises entre 200 et 250 mm. On suppose que le béton ne contient pas d'air entrainé et que le volume d'air piégé est de 2 % (il peut être augmenté à 5 ou 6 % quand le béton contient de l'air entrainé). On prend un volume optimal de gros granulat égal à 65 % du volume du BHP.

I.10. MICROSTRUCTURE DES BHP

Le BHP, comme tous les bétons, est avant tout un matériau hétérogène, constitué de deux phases principales : une phase liante que constitue la pâte de ciment durcie (matrice cimentaire) et une phase granulaire (granulats). La pâte de ciment durcie assure la fonction de « colle » responsable de l'adhérence des phases granulaires, conférant la rigidité au matériau (Phase liante). Cette pâte est polyphasique : phase solide, phase liquide et phase gazeuse [69].

La phase solide est constituée des hydrates de ciment (grains hydratés) et d'anhydres (grains non hydratés). Elle contient principalement des silicates de calcium hydratés C-S-H, issus des réactions d'hydratation entre les constituants du ciment Portland et l'eau. La phase liquide correspond à l'eau interstitielle et la phase gazeuse aux vides remplis d'air et/ou de vapeur d'eau.

I.10.1. CONSTITUTION

Lorsque l'on ajoute de la fumée de silice à la formulation d'un BHP, la réaction pouzzolanique contribue, par la formation d'une phase liante, au renforcement des propriétés mécaniques du matériau durci. De la chaux est consommée et est remplacée par des C-S-H, ce qui va encore dans le sens d'une densification de la pâte : la portlandite sera plus finement distribuée dans la microstructure des BHP.

La microstructure des BHP est plus homogène, apparemment plus amorphe et plus dense qu'un béton conventionnel, grâce au faible rapport 'E/C' de ce type de formulation (rendu

possible par l'utilisation d'un fluidifiant et l'effet granulaire des fumée silice) et à la réaction pouzzolanique (portlandite en moindre quantité et cristaux plus fins et disséminés) [99].

I.10.2. PEAU DU BÉTON

La pâte durcie montre toujours une mince couche poreuse comme lors de la mise en place du béton. Juste quelques cristaux de chaux de plus petite taille que dans le béton classique peuvent être localisés. Quelques fissures (inférieure à 1 μm de largeur) apparaissent, ainsi qu'une grande proportion de gel de C-H-S, caractéristique du BHP [39].

On remarque aussi une structure alvéolée qui représente probablement les empreintes laissées par les grains de ciment lors de la fracturation de l'échantillon. Ceci indique la présence d'un gradient de rapport 'E/C' dans le matériau [39].

Tout récemment, quelques auteurs ont reconnu l'importance de la peau de béton (tout au moins celle des 20 à 30 premiers mm) du point de vue de la durabilité. En effet, il est bien connu depuis longtemps que la peau du béton n'a pas exactement la même composition ni la même microstructure que le cœur du béton à cause de l'effet de paroi [39].

I.10.3. INTERFACE PÂTE-GRANULATS

L'interface pâte granulats, appelée aussi « l'auréole de transition » est une partie de la pâte de ciment au voisinage des granulats (quelques microns) qui comporte une porosité plus importante que dans la masse.

Pour les bétons à hautes performances, la réduction de la porosité et de l'épaisseur de cette zone est obtenue grâce à l'ajout des additions minérales. En comparant avec le BO (béton ordinaire), où l'auréole de transition est d'environ 50 μm , son épaisseur pour les BHP est limitée à 12 μm . Certaines sources signalent l'absence de la zone de contact dans les bétons à haute performance où l'ajout de la fumée de silice permet la consommation de la portlandite, en densifiant la structure du matériau, tout en améliorant ses performances mécaniques [4]. La qualité de la zone de transition dépend aussi du rapport 'E/C'. Lorsque 'E/C' augmente, cette zone devient plus épaisse, plus poreuse et par conséquent moins résistante.

Dans les BHP, la densité est aussi accrue par les ultrafines. Il n'y a également pas de ressuage autour des granulats. Comme par ailleurs, la pâte subit un retrait d'autodessiccation important, elle exerce une puissante étreinte sur les granulats entraînant ainsi une amélioration considérable de l'adhérence [39].

La microstructure de la pâte de ciment hydraté du béton de 20 MPa est très ouverte et l'on peut y voir des pores, de grands cristaux d'ettringite et de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec de plus petites aiguilles de silicate de calcium hydraté [39].

Il est possible de voir que la zone de transition entre la pâte de ciment et les granulats est très poreuse dans le cas du béton usuel. A l'inverse, il est impossible de discerner les moindres cristaux dans la microstructure du BHP qui a un rapport 'Eau/Liant' de 0,25 ; la pâte de ciment hydraté a un aspect amorphe et est très compacte [39].

Malgré quelques divergences des avis sur l'existence ou non d'une zone de transition dans les BHP, et notamment ceux aux fumées de silice, cette zone est extrêmement réduite voire inexistante [87].

I.11. APPLICATIONS DES BHP

Le BHP est un matériau relativement nouveau, et jusqu'à maintenant, il n'a été utilisé que dans la construction d'un petit nombre de structures.

A l'heure actuelle, quatre pays développent particulièrement l'utilisation des BHP, la Norvège orientée essentiellement vers les structures Offshore, les Etats-Unis et le Canada intéressés par la construction des gratte-ciels et la France oriente ses efforts vers les ouvrages d'art. A ces trois domaines principaux, il faut ajouter quelques applications plus particulières, comme les éléments préfabriqués pour le bâtiment, les chaussées, les assainissements, les tunnels et encore les centrales nucléaires.

Les avantages du BHP se concrétisent principalement à la résistance mécanique, la résistance aux agents agressifs et la bonne ouvrabilité. Ces avantages permettent d'utiliser le BHP par rapport au béton à résistance normale utilisé traditionnellement pour les raisons suivantes :

- ✚ La résistance au jeune âge du BHP autorise des décoffrages rapides, ainsi que des mises en précontrainte accélérées. Les applications sont nombreuses en préfabrication (poutres, planchers), et sur chantier (voussoirs de ponts, poteaux). Cette résistance précoce élevée aux BHP, permet aussi d'accélérer les cadences de fabrication en usine ou sur chantier [9].
- ✚ Les hautes résistances en service permettent la réalisation des structures de bâtiments et d'ouvrages (bâtiments de grande hauteur, ponts, enceintes nucléaires, structures réticulées) conciliant contraintes élevées et diminution des sections.
- ✚ La durabilité et la résistance aux agents agressifs sont déterminantes pour les ouvrages à la mer, les structures offshore, les ouvrages exposés au gel.
- ✚ Il faut également mentionner l'emploi de bétons HP en relation avec leur bonne ouvrabilité. C'est le cas des bétons utilisés dans les bâtiments de grande hauteur et qui sont pompés, ou dans la réalisation de poutres avec un ferrailage laissant peu de place au passage du béton.
- ✚ Un autre avantage du BHP par rapport au béton ordinaire est l'aspect visuel des surfaces de béton, tant coulées sur place que préfabriquées. L'apparition de petites bulles d'air à la surface est souvent très limitée. La surface présente généralement une bonne texture, grâce à la haute teneur en fines. Le BHP a un nouvel aspect de l'enveloppe de la construction, avec un regain d'attention porté aux éléments architecturaux tels que les arêtes, les arcs, les voûtes, etc.

Détails d'un nombre considérable de quelques exemples d'applications construits en béton à haute performance à travers le monde sont donnés ci-dessous.

I.11.1. LES PONTS

- ◆ **Pont de Joigny** : Le pont de Joigny (Figure I.14) a été construit en 1988 (France) .Il est constitué de trois travées continues de portées : 34 m, 46 m, 34 m, d'une longueur totale de 114 m et a un largeur total de 15.80 m [100]. Il a été le premier

pont conçu et construit en France avec le BHP (granulats locaux, pas de fumé de silice, affaissement : 22 cm, $R_{28j} = 78 \text{ MPa}$) [101].

- ♦ **Pont de l'île de Ré** : la construction du pont de l'île de Ré (Figure I.14) de 3 km de long a débuté en septembre 1986 et il a été ouvert à la circulation le 19 mai 1988. Il a été construit avec un BHP contenant de fumé de silice (affaissement : 15cm, $R_{28j_{moy}} = 67.7 \text{ MPa}$) [102].
- ♦ **Pont de Pertuiset** : Il s'agit d'un pont haubané d'une portée de 132 m franchissant la Loire et réalisé par encorbellements successifs (BHP avec de fumé de silice, $R_{16heures} = 33 \text{ MPa}$, $R_7 = 60 \text{ MPa}$, et d'environ 80 MPa à 28 jours), (Figure I.14) [102].
- ♦ **Viaduc de Sylans** : relie Macon à Genève (Figure I.14), il a une longueur de 1268m, Il a été construit avec un BHP sans fumé de silice (affaissement : 20cm – 23cm, $R_{28j} = 68.5 \text{ MPa}$) [102].

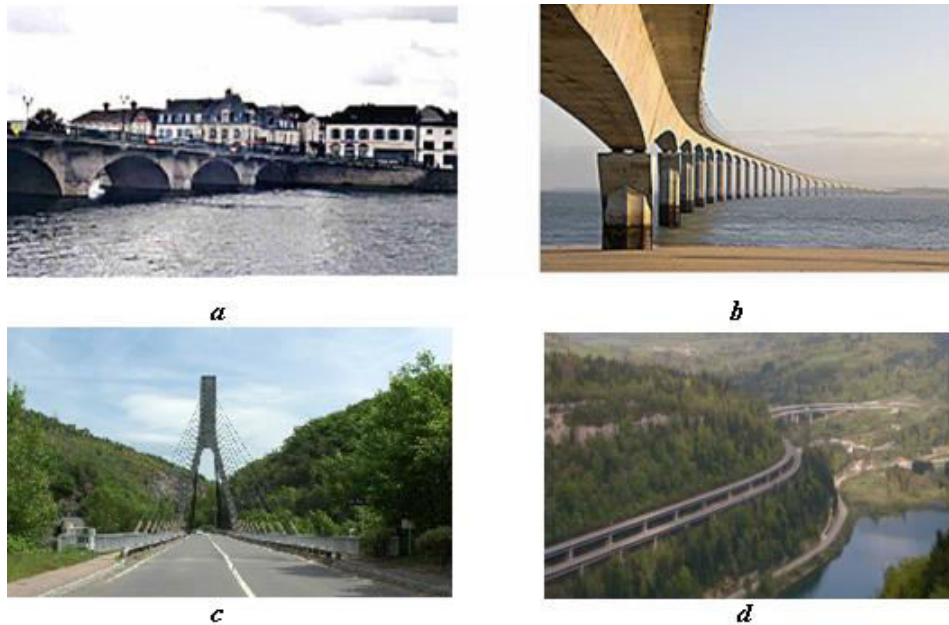


Figure I.14. Différents types de ponts réalisés en BHP

- a - Pont de Joigny (France) b - Le pont de l'île de Ré (France).
 c - Pont de Pertuiset d - Viaduc de Sylans

I.11.2. LES BÂTIMENTS

- ♦ **Le Water Tower Place** : construit en 1975 à Chicago (Figure I.15). La résistance du béton s'est élevée MPa par MPa de 20 à 30 MPa puis à 60 MPa ; un des avantages des BHP puisqu'en faisant simplement varier la résistance du béton pour construire les poteaux de l'édifice, il leur a permis de leur conserver une section constante, ce qui a permis d'utiliser un seul coffrage pour tous les poteaux de l'édifice et aussi de représenter évidemment des économies de main-d'œuvre considérables ($R_{7j} = 50.3 \text{ MPa}$, $R_{28j} = 64.8 \text{ MPa}$, $R_{56j} = 72.4 \text{ MPa}$, $R_{91j} = 78.6 \text{ MPa}$) [103].
- ♦ **Le Scotia Plaza** : construit à Toronto (Canada) en 1987-1988 (Figure I.15), c'est le premier gratte-ciel canadien où l'on ait utilisé un BHP et aussi le premier dans le

monde construit avec un BHP contenant du laitier de haut fourneau ($R_{7j} = 66.9$ MPa, $R_{28j} = 83.4$ MPa, $R_{56j} = 89$ MPa, $R_{91j} = 93.4$ MPa) [103].

- ♦ **Le Two Union Square Building** : La construction sur Two Union Square a commencé en 1987 et a été terminée en 1989, un édifice de 58 étages, à Seattle aux États-Unis (Figure I.15). C'est la première fois dans le monde que l'on a utilisé du BHP confiné pour construire un gratte-ciel ($R_{2j} = 64.8$ MPa, $R_{7j} = 90.7$ MPa, $R_{28j} = 119$ MPa, $R_{91j} = 145$ MPa) [103].

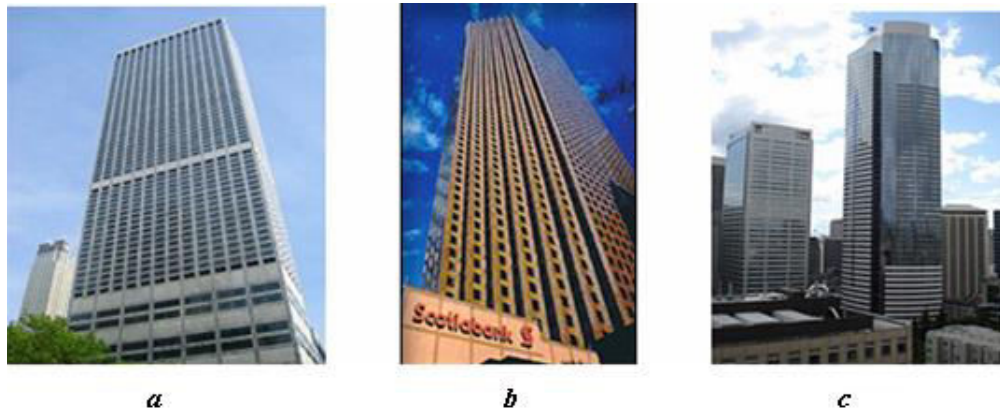


Figure I.15. Différents types de bâtiments réalisés en BHP

- a - Water Tower Place (Chicago).
- b - Le Scotia Plaza (Canada).
- c - Two Union Square Building (USA).

I.11.3. LES TUNNELS

- ✚ **Le tunnel de Villejust** : construit à Paris et se situe entre Massy LNA et Courtalain BIF. (4806 m) [104].
- ✚ **Le tunnel sous la manche** : Le tunnel sous la manche est un tunnel ferroviaire reliant la Grande-Bretagne et la France, long de 49,7 kilomètres dont 37 sous la mer, ce tunnel passe sous la manche entre Coquelles et Folkestone à quelques kilomètres de Douvres [104]. Il a été inauguré le 6 mai 1994. Aujourd'hui, ce tunnel fait circuler jusqu'à 53 trains par jour, assurant une liaison France-Angleterre en seulement 35 minutes.



Figure I.16. Différents types de tunnels réalisés en BHP

- a - Tunnels de Villejust
- b - Tunnel sous la manche

I.11.4. LES PLATES-FORMES PÉTROLIÈRES

Des BHP ont été utilisés de façon intensive pour construire plus de 20 plates-formes pétrolières en Norvège à partir des années 1970. Toutes ces plates-formes présentent, jusqu'à présent, un très bon comportement en service dans l'environnement particulièrement difficile que constitue la mer du Nord [9].

L'utilisation particulière des BHP dans plates-formes pétrolières se trouve dans les caractéristiques de la plus grande plate-forme pétrolière : la plate-forme Gullfaks C.

Le champ pétrolier Gullfaks a été développé au moyen de trois des ces plates-formes en béton : Gullfaks A installé par 135 m de fond, Gullfaks B installé par 141 m de fond et Gullfaks C installé par 216 m de fond. La résistance caractéristique de ce béton était de 65 à 70 MPa [9].

Les travaux en BHP ne s'arrêtent pas à ces types de projets cités, ils sont utilisés dans plusieurs autres domaines tels que les travaux souterrains (tunnels, etc.), les plates forme de forage de pétrole, les passerelles telle que les aéroports, etc. Les architectes ont ajouté une nouvelle technique de conception telles que les façades en BHP qui sont lisses, durables et donnent une bonne esthétique.

En Algérie, la technologie des BHP demeure encore à l'état embryonnaire et l'utilisation de ce matériau n'a pas encore dépassé le 7% (le pont de Mila, le métro d'Alger,...). Cependant les horizons et les perspectives de l'évolution de ce matériau sont encourageants.

I.12. CONCLUSION

Dans cette partie de la recherche bibliographique, on a présenté l'historique et les principales propriétés et constituants du BHP ainsi que sa formulation et son utilisation dans le monde.

Par la comparaison entre les BO et les BHP, il a été mis en évidence une différence intrinsèque existant entre ces deux types de béton. Les BHP contiennent des ajouts chimiques et notamment la fumée de silice, permettant l'amélioration de sa résistance mécanique. Ils sont caractérisés par une faible perméabilité, une grande densité, et une durabilité accrue pour développer certaines caractéristiques, à savoir : la résistance mécanique, la résistance au feu et les caractéristiques rhéologiques.

Comme dans le cas des bétons usuels, certains BHP ont déjà été qualifiés de spéciaux et ont une caractéristique qui les distingue des BHP les plus courants. On distingue les BHP légers, les BHP lourds, renforcés de fibres, les BHP à air entraîné, les BHP compactés au rouleau et les BHP confinés.

Les bétons à hautes performances demeurent des bétons destinés aux chantiers exceptionnels et modifient profondément les conditions de travail sur le chantier ou à l'usine de préfabrication : acquisition rapide de la résistance, rhéologie adaptable à la nature et aux dimensions de l'ouvrage, etc., signifiant en fait une réduction considérable de la pénibilité et donc de l'accidentabilité, réduction des matériels de chantiers, réduction des délais de fabrication et donc des durées de chantiers.

Sans les BHP, on n'aurait pas pu construire le tunnel sous la Manche, l'Arche de la Défense, le Pont de Normandie, etc., ou en tout cas, pas de la même façon.

Chapitre II

Caractérisation des matériaux et techniques expérimentales

II.1. INTRODUCTION

L'emploi judicieux des matériaux utilisés dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés, physiques, chimiques, minéralogiques, et mécaniques, permettant de faire un choix répondant à leur destination. Ces connaissances doivent être obtenues en utilisant des techniques expérimentales fiables et normalisées. Une nouvelle méthode appelée "plans d'expériences" va être également utilisée pour l'optimisation des essais de formulation du composite étudié. Tout cela nécessite, donc, d'être clarifié avant de présenter les résultats obtenus.

Nous allons consacrer, donc, ce deuxième chapitre à une caractérisation générale des matières premières utilisées et une brève présentation des principales techniques expérimentales et méthodes utilisées.

II.2. MATIÈRES PREMIÈRES

Pour commencer, il convient de signaler que le composite étudié est composé de ciment, ajouts minéraux, sable, gravier, eau et éventuellement un adjuvant. La caractérisation générale de tous ces matériaux est présentée en détail ci-dessous:

II.2.1. CIMENT

Le ciment utilisé est un ciment blanc de type CEM II/A-L (CPJ 52,5 N) à hautes résistances initiales et finales issu du broyage d'un clinker blanc. Ses caractéristiques chimiques, minéralogiques et physico-mécaniques sont données dans les tableaux II.1 et II.2.

Tableau II.1. Propriétés physico-mécaniques du ciment utilisé.

Caractéristiques		Ciment blanc 52.5
Masse volumique absolue (ρ_s) (kg/m ³)		3120
Masse volumique apparente (ρ_a) (kg/m ³)		1180
Surface spécifique (A) (m ² /kg)		495
Consistance normale (% H ₂ O)		25
Début de prise (mn)		1 h 45 mn
Fin de prise (mn)		2 h 60 mn
Résistance à la compression (MPa)	2 jours	30,69
	28 jours	57,51

Tableau II.2. Analyse chimique du ciment utilisé

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LIO
Contenu %	23.5	3.3	0.22	63.7	0.7	2.2	0.4	0.5	4.7

D'autre part, et d'après la formule de Bogue, les constituants principaux de ce ciment sont :

$$C_3S = 55 \% \quad C_3A = 8,37 \% \quad C_2S = 23,49 \% \quad C_4AF = 0,67 \%$$

Il est à noter que ces pourcentages respectent bien les limites recommandées pour les ciments usuels [30].

II.2.2. AJOUTS UTILISES

Les ajouts utilisés sont des fines de deux natures différentes: des fines siliceuses (sable de dune finement broyé) et des fines calcaires (Tamisât de déchet de concassage d'agrégats calcaires)

II.2.2.1. FINES SILICEUSES (SDB)

Les fines siliceuses sont obtenues en broyant finement un sable de dune (Figure II.1.(a)) provenant de la région de Djelfa (Algérie). Elles sont destinées à être utilisées comme ajout minéral par substitution au ciment. C'est un sable fin d'origine éolienne se trouvant en abondance en Algérie.



a) Sable de dune avant broyage

b) Sable de dune broyé

Figure II.1. Aspect général du sable de dune (avant et après broyage)

Le broyage a été réalisé à sec à l'aide d'un broyeur à boulets de capacité importante. Il a été poussé jusqu'à ce qu'à l'obtention d'une poudre passant au tamis de mailles 80 μm (Figure II.1.(b)).

La masse volumique absolue des fines de SDB est de 2,791 g/cm^3 et la surface spécifique de blaine est de l'ordre de 4000 cm^2/g .

La nature de ces fines est essentiellement siliceuse ce qui est montré par le tableau II.3 et la figure II.2 :

Tableau II.3. Analyse chimique du sable de dune broyé [105].

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P.F
%	86.04	1.35	0.86	6.63	0.08	5.00

La figure II.2 présente le spectre DRX du sable de dune :

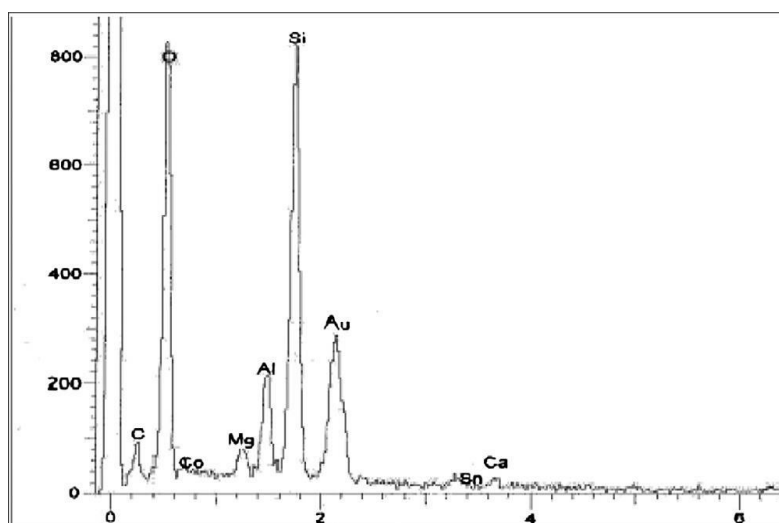


Figure II.2. Spectre DRX du sable de dune broyé.

II.2.2.2. FINES CALCAIRES (FC)

Les fines calcaires utilisés sont de couleur blanche et de nature essentiellement calcaire (Tableau II.4). Elles sont obtenues par tamisage au tamis 80µm des déchets de concassage d'agrégats calcaires (Figure II.3.(b)).



a) Déchet de concassage

b) Fillers calcaires

Figure II.3. Aspect général du déchet de concassage (avant et après tamisage)

Tableau II.4. Composition chimique du filler calcaire utilisé.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	PAF
Contenu (%)	0.76	0.41	0.23	54.9	0.61	0.24	0.04	0.61	0.005	36.3

Ces principales caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau II.5

Tableau II.5. Caractéristiques physiques des fines calcaires.

	Fine calcaire
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,14
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,7
Surface spécifique (cm ² /g)	5000

Les différents minéraux sont donnés par le diffractogramme DRX suivant :

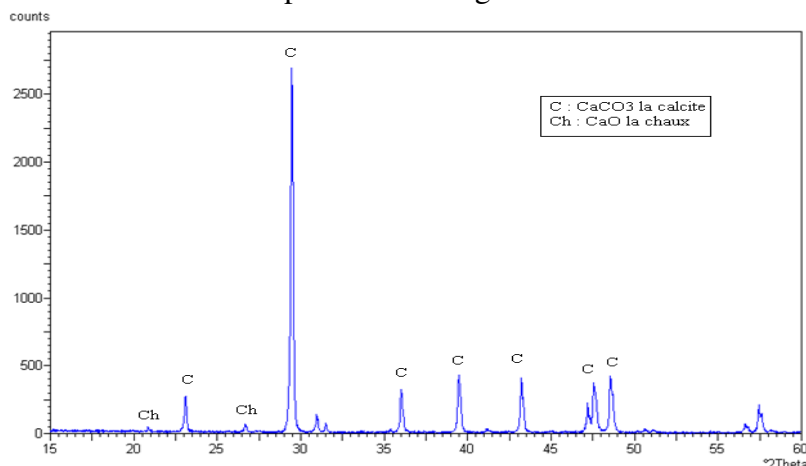


Figure II.4. Diffractogramme aux rayons X des fillers calcaires.

La figure II.4 montre que ces fines se composent en général de calcite (CaCO₃) et de chaux (CaO), ce qui montre que leur nature est essentiellement calcaire.

II.2.3. SABLE

Le sable utilisé est un sable alluvionnaire de nature siliceuse (figure II.5), de dimensions 0/5mm extrait de (Oued M'zi) de la région de Laghouat et utilisé couramment dans la confection du béton dans cette région. C'est un sable moyen ayant un module de finesse d'environ 2,65 et une masse volumique absolue de 2,58 g/cm³.

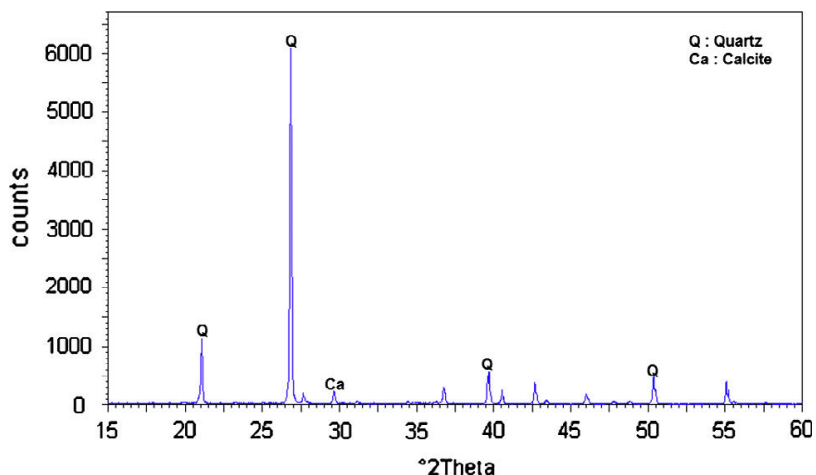


Figure II.5. Spectre DRX du sable alluvionnaire [106].

Les grains du sable alluvionnaire utilisé sont caractérisés par une forme roulée et surface lisse (figure II.6) qui sont dues aux écoulements des eaux de l'oued [107].

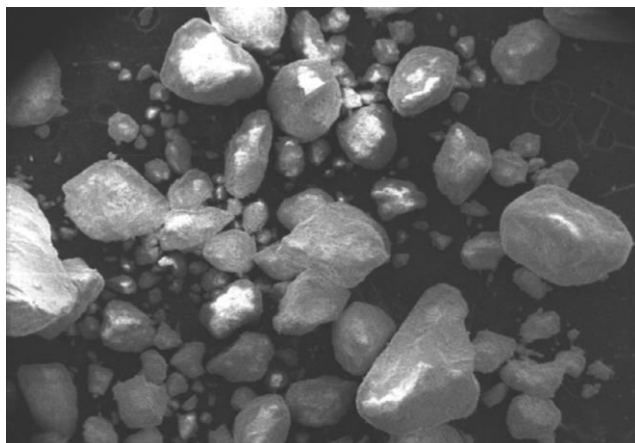


Figure II.6. Aspect général des grains de sable alluvionnaire [106].

La courbe granulométrique du sable alluvionnaire utilisé présentée graphiquement dans la figure II.7, montre que la granularité est continue, étalée et assez régulière, ce qui représente une répartition assez homogène des classes granulaires. Elle est entièrement enveloppée par le fuseau recommandé pour les bétons, donc c'est un sable acceptable concernant son utilisation dans la confection des bétons.

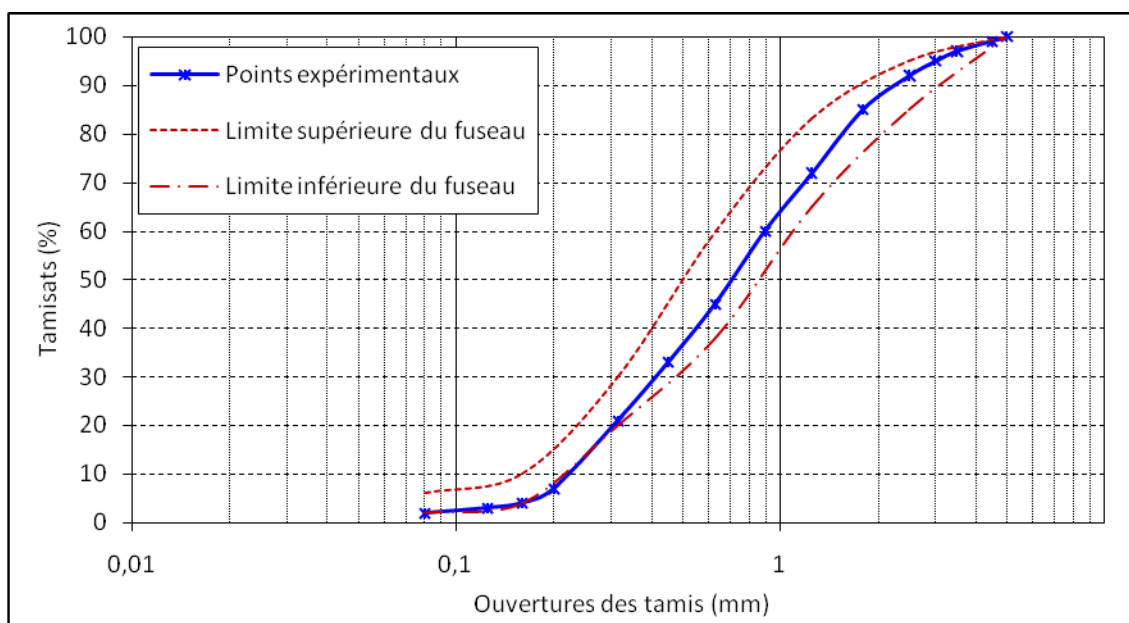


Figure II.7. La courbe granulométriques du sable alluvionnaire utilisé

MEDAFLOW-30 permet de diminuer le rapport ‘Eau/Ciment’ (E/C) tout en améliorant considérablement la fluidité du béton. Il permet aussi d’augmenter les résistances mécaniques au jeune âge et à long terme.

La plage de dosage recommandée du MEDAFLOW-30 est de 0.5 à 2 %. Toutefois, le dosage optimal doit être recherché selon le type de béton et les propriétés recherchées par la réalisation des gâchés au laboratoire.

Le volume total d’eau de gâchage est le volume d’eau auquel il faut ajouter la quantité d’eau équivalente apportée par le fluidifiant [108].

II.2.6. EAU

L’eau qui a été utilisée pour le gâchage est une eau potable sans aucun traitement supplémentaire. Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5.

L’analyse chimique de l’eau utilisée est donnée dans le tableau II.6 suivant :

Tableau II.6. Analyse chimique de l’eau utilisée [109].

Espèces chimiques	Quantité (mg/l)
Ca ⁺	119,04
Mg ⁺²	32,93
Na ⁺	144,90
K ⁺	5,69
Cl ⁻	169,96
SO ₄ ⁻²	420
HCO ₃ ⁻	153,80
NO ₃ ⁻	11,07

II.3. MÉTHODE ET ESSAIS

II.3.1. LA MÉTHODE DES PLANS D’EXPÉRIENCES

La formulation des bétons à hautes performances est une opération plus complexe que celle des bétons classiques parce que le nombre de ses constituants est plus élevé.

Donc, dans la formulation de ce type de béton, on doit prendre en considération l’assurance d’une bonne combinaison entre les matériaux utilisés et de rechercher le dosage convenable de chacun de ces constituants.

Dans le but de comprendre le rôle joué par les différents constituants, il est nécessaire d’effectuer une étude paramétrique. Généralement, la démarche d’une étude paramétrique classique est basée sur la variation de chaque paramètre séparément afin d’observer son influence sur l’évolution des propriétés étudiées.

Donc, cette démarche ne peut pas prendre en considération toutes les interactions possibles entre les effets des constituants et ne permet pas d'établir l'ordre d'importance des paramètres sur les propriétés étudiées.

De ce fait, une démarche expérimentale capable de prendre en considération l'effet de chaque paramètre séparément et en interactions entre plusieurs paramètres sur les propriétés étudiées est vraiment nécessaire, tout en effectuant le minimum nombre possible d'essais aux laboratoires. L'une des méthodes les plus connues est la méthode des plans d'expériences. Grâce à une approche statistique, cette dernière permet de conduire un nombre bien déterminé d'essais et d'avoir des résultats capables de dévoiler l'effet de chaque paramètre étudié séparément et en interactions avec d'autres paramètres.

Le détail de cette méthode telle qu'elle a été utilisée dans le présent travail est donné au chapitre III.

II.3.2. ESSAIS RÉALISÉS

II.3.2.1. RÉALISATIONS DES GÂCHÉES

Concernant les techniques de fabrication et de mise en œuvre de BHP, les commentaires du Bulletin officiel d'août 2000 [15] indiquent que le temps de malaxage de ces bétons est en général un peu plus long que celui des bétons usuels. Pour cela, la durée du malaxage a été modifiée, et donc prolongée au minimum d'une minute de plus de façon à assurer un enrobage acceptable des granulats et une uniformité convenable au mélange. Dans notre cas, la séquence de malaxage a aussi été modifiée, car nous avons utilisés un adjuvant plastifiant réducteur d'eau.

II.3.2.2. MANIABILITÉ

De l'ouvrabilité dépendent, en effet, la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, enrobage et adhérence des armatures, cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation, parement de belle apparence.

L'aptitude du béton frais à bien se mouler dans des coffrages et autour des armatures tout en restant homogène, bref, à bien se mettre en place, est appelée ouvrabilité.

La consistance n'est une caractéristique intrinsèque du béton mais dépend de l'appareil qui sert à la mesurer, c'est pourquoi, quand on donne une valeur de consistance, il faut dire comment elle a été mesurée. Pour des raisons pratiques, il faut éviter de multiplier les types d'appareil de mesure de la consistance. Cependant on peut étendre indéfiniment le domaine d'application d'un appareil donné.

L'essai d'affaissement du cône d'Abrams constitue la méthode la plus couramment employée pour évaluer la consistance du béton car il est très simple à mettre en œuvre, rapide et relativement fiable.

Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40mm [NF P 18-451].

Le béton est introduit dans un moule conique normalisé, légèrement huilé, en trois couches d'égales hauteurs. Chacune d'elles est piquée 25 fois à l'aide d'une tige. Une fois le moule est rempli, nous arasons son bord supérieur, puis démoulons. Le béton ainsi démoulé s'affaisse.

On mesure la hauteur d'affaissement qui est fonction de la consistance du béton.

II.3.2.3. CONFECTION DES ÉPROUVETTES

Toutes les formulations des BHP étudiées ont été confectionnées suivant le même mode opératoire, avec des moyens matériels identiques et coulées dans les mêmes géométries de moules dans des conditions similaires.

L'utilisation d'éprouvettes plus petites est préférable dans le cas de BHP [17]. Les éprouvettes préparées dans cette étude sont de formes prismatiques ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) pour la détermination de la résistance à la flexion à raison de trois éprouvettes par essai. Les 06 demi-éprouvettes ainsi obtenues sont utilisées pour la mesure de la résistance à la compression selon des cubes $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$.

Les moules utilisés ont été lubrifiés, remplis de béton et compacté mécaniquement à l'aide d'une aiguille vibrante plongée dans la masse du béton afin d'avoir un béton bien compact avec moins de vides.

Les éprouvettes sont maintenues dans l'environnement du laboratoire. Pour éviter l'évaporation de l'eau de gâchage, elles sont couvertes par du plastique, jusqu'au jour du démoulage qui aura lieu 24 heures après le coulage du béton. Ensuite les éprouvettes sont pesées pour déterminer la densité à un jour puis elles sont affectées directement au milieu de conservation jusqu'au jour de l'essai.

II.3.2.4. MODE DE CURE

Les éprouvettes de béton sont conservées dans leur moule en salle humide (20°C , 95% HR) pendant 24 heures. Elles subissent ensuite, une cure appropriée selon le type d'essai :

- ✚ pour les essais mécaniques de l'optimisation de la formulation du BHP, elles sont immergées dans l'eau courante et cela jusqu'au jour de l'essai.
- ✚ pour les essais de durabilité, les éprouvettes ont été conservées dans une solution saturée en chaux jusqu'à 28 jours, les échantillons destinés pour l'étude de la durabilité sont immergées dans deux milieux différents afin de suivre les résistances de ces éprouvettes dans ces différents milieux (milieu de sulfates de magnésium MgSO_4 , milieu de l'acide chlorhydrique HCl).

II.3.2.4.1. EAU DOUCE

L'eau douce utilisée pour la conservation des éprouvettes des mortiers est une eau potable du robinet, sa composition chimique est la même que celle d'eau de gâchage décrite précédemment.

Pour ce milieu, la conservation est faite dans le cas de l'étude du comportement physico-mécanique des BHP formulés à base de SDB et FC.

II.3.2.4.2. SOLUTION DE LA CHAUX

Ce milieu est considéré comme un milieu non agressif, parce qu'il est riche en calcium par dissolution de la chaux dans l'eau, donc il est alcalin. Les réactions d'hydratation doivent avoir lieu d'une manière normale, loin de toute lixiviation qui peut être due aux milieux acides. Pour ce milieu, on a choisit une concentration massique de 10% [110].

II.3.2.4.3. SOLUTION DE $MgSO_4$

D'après la littérature, ce milieu est agressif, sa concentration massique est choisie de 10% [111] afin d'accélérer l'attaque des bétons par les sulfates [80]. Le degré d'agressivité de cette solution est classé A₄ (environnement très fortement agressif) ($MgSO_4 > 9000$ mg/l) [NF P 18-011].

II.3.2.4.4. SOLUTION DE HCl

Ce milieu est également agressif, d'après la littérature, sa concentration massique est prise égale à 3% afin d'accélérer également l'attaque des bétons par cet acide [112,113].

La conservation des éprouvettes est faite dans des récipients en plastique (figure II.9).



Figure II.9. Conservation des éprouvettes dans les milieux de conservation.

II.3.2.5. LES ESSAIS DE RÉSISTANCES

L'évolution de la résistance a été suivie au cours du temps, en effectuant des essais de flexion et de compression à différents âges :

- ✚ le 7^{ème} et 28^{ème} jour pour les éprouvettes de béton conservées dans l'eau courante.
- ✚ Le 28^{ème}, 90^{ème} et 180^{ème} jour pour les éprouvettes de béton ayant subit les cycles de mouillage-séchage pendant 180 jours et pour les échantillons immergés dans l'eau saturée en chaux.

II.3.2.6. LES ESSAIS DE DURABILITÉ

Afin d'évaluer la durabilité des bétons durcis exposés aux sulfates et aux acides et mettre en relief l'influence de l'addition de SDB et de FC, on a réalisé des essais mécaniques, physiques et chimiques sur les éprouvettes de bétons immergées pendant 180 jours dans les solutions de 10 % de sulfates de magnésium, 3% d'acide chlorhydrique et dans l'eau saturée en chaux (milieu de référence).

Pour cela on a procédé comme suit :

- ✚ Suivi de l'évolution de la résistance à la compression des différents bétons ;
- ✚ Suivi de l'évolution de la résistance à la flexion des différents bétons ;
- ✚ Suivi de la variation de masse;
- ✚ Suivi de changement de longueur (expansion ou retrait) ;
- ✚ Analyse visuelle des éprouvettes et étude des différentes phases minérales des bétons par DRX.

II.3.2.6.1. RÉSISTANCE MÉCANIQUE

Le comportement mécanique de tous les BHP a été étudié en flexion simple (3 points) et en compression uniaxiale sur des éprouvettes prismatiques 70×70×280 mm³.

A chaque échéance, trois échantillons sont testés en flexion simple sur le bâti de flexion d'une presse du type « Matest » ayant une capacité maximale 25 kN. La vitesse de chargement a été réglée à 0,05 ± 0.01 MPa /seconde jusqu'à la rupture selon la norme [NF P 18-407].

Les six demi-éprouvettes obtenus après rupture en flexion sont alors soumis à une compression uniaxiale sur le bâti de compression d'une presse de marque « Controls », à double quadrant ayant une capacité maximale de 2000 kN, suivant une vitesse de chargement de 0,5 kN/s.

II.3.2.6.2. VARIATION DE MASSE

Le suivi de variation de masse est effectué en utilisant une balance de précision élevée.

Une fois l'éprouvette retirée de son milieu de conservation, on l'essuie avec un tissu sec et on la laisse pendant 30 minutes à l'air libre du laboratoire, puis on effectue la pesée, on enregistre l'indication et ensuite on la remet à l'immersion dans son milieu de conservation.

La variation de la masse est évaluée comme suit :

$$\text{Variation de la masse (\%)} = \left[\frac{(M_2 - M_1)}{M_1} \right] \times 100 \quad (\text{II.1})$$

M_1 : la masse du spécimen, avant immersion en (g);

M_2 : la masse de spécimen après immersion en (g).

Remarque :

Un résultat avec un signe plus (+) indique un gain en masse, et avec un signe moins (-) indique une perte en masse.

La mesure de la masse est réalisée sur trois éprouvettes de chaque béton à chaque échéance en prenant la moyenne des trois mesures.

II.3.2.6.3. CHANGEMENT DE LONGUEUR

Pour faciliter le travail expérimental, nous avons choisi d'effectuer l'étude de retrait sur des bétons où nous avons utilisé des éprouvettes prismatiques de dimensions 70x70x280 mm³, selon la norme [NF P 15-433]. Ces éprouvettes sont équipées de plots métalliques à chaque extrémité et placées verticalement dans l'appareil de mesure du retrait, qui permet le suivi de la variation de la longueur de l'échantillon.

La fréquence de suivi est comme suit :

- ✚ Du 1^{er} jour au 28^{ème} jour : les mesures se font chaque trois jours après le démoulage et durant 28 jours.
- ✚ A partir du 28^{ème} jour : c'est le début des cycles immersion-séchage, cette grandeur peut être un retrait ou un gonflement.

L'évaluation de changement de longueur de chaque éprouvette de béton à chaque échéance s'effectue comme suit :

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \quad (\text{II.2})$$

ΔL : changement de longueur à l'âge x , en %

L_x : lecture sur comparateur pour le spécimen à l'âge (x) moins la lecture sur comparateur pour l'éprouvette de référence à l'âge (x) en millimètres

L_i : lecture initiale sur comparateur pour le spécimen moins la lecture sur comparateur pour l'éprouvette de référence en même temps, en millimètres

L_g : longueur nominale de mesure, 280 mm.

Remarque : Lorsque ΔL est positif on parle alors de gonflement et lorsque ΔL est négatif il y a alors retrait de l'éprouvette.

Le changement de longueur est obtenu en faisant la moyenne sur 3 éprouvettes issues du même béton.

II.3.2.6.4. ANALYSE VISUELLE ET PAR DRX

Afin d'avoir une idée sur les différentes phases minérales des composites étudiés qui vont nous aider certainement à interpréter les différents résultats obtenus, une analyse de DRX a été menée sur les bétons étudiés en utilisant un appareil X'PERT couplé à un système informatique (disponible à l'université de Laghouat, département de physique) permettant le tracé et l'exploitation des résultats de l'analyse.

Dans ce travail, on a broyé de petites parties de la surface des échantillons après 180 jours de cure, jusqu'à l'obtention d'une poudre fine. Cette dernière a été exposée aux rayons X afin d'avoir une idée sur les nouveaux produits formés.

II.3.2.6.5. CYCLE IMMERSION-SÉCHAGE

Afin d'accélérer la dégradation des bétons et d'évaluer le degré d'agression de chaque milieu sur les bétons étudiés, des cycles « immersion-séchage » ont été effectués comme suit :

a- Cycles de sept jours :

Il consiste à immerger les éprouvettes de béton dans les solutions préparées pendant 6 jours suivis d'un jour de séchage dans l'étuve (70°C) (Figure II.10). Ceci a été effectué durant 2 mois (8 cycles).

b- Cycles de trente jours :

Ce cycle consiste à immerger les éprouvettes dans les solutions durant 29 jours suivis d'un jour de séchage dans l'étuve (70°C) (Figure II.10). Ceci a été effectué durant 2 mois (2 cycles).

c- Cycles de soixante jours :

Dans ce cas, l'immersion des éprouvettes dans les solutions se fait en 59 jours suivis d'un jour de séchage dans l'étuve (70°C) (Figure II.10). Ceci a été effectué durant 2 mois (2 cycles).

Le détail des cycles est représenté par les schémas a, b, c de la figure suivante :

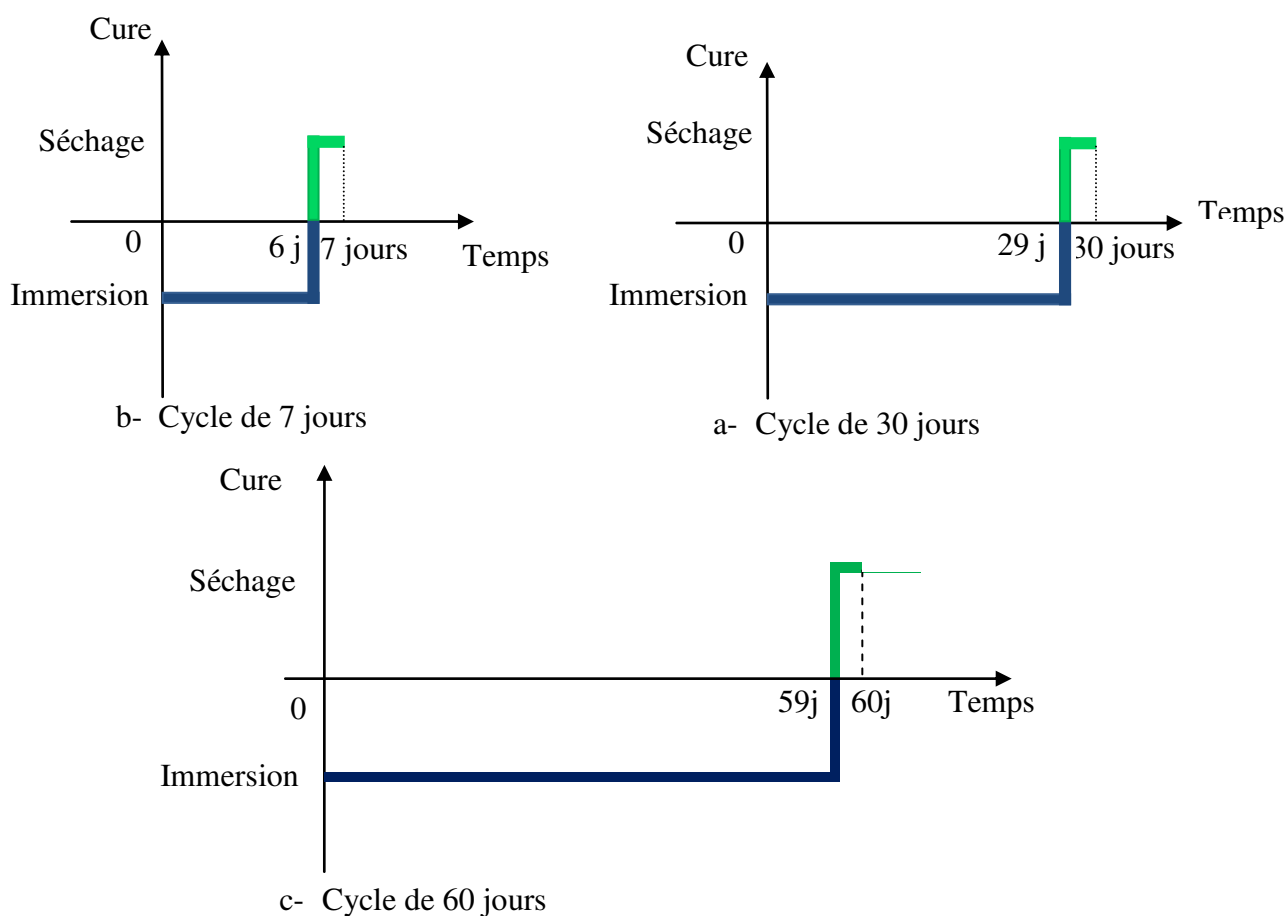


Figure II.10. Détail des cycles « immersion-séchage ».

II.4. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Le programme expérimental se divise en deux grandes parties :

A) DANS LA PREMIÈRE PARTIE ON ÉTUDIE :

APPLICATION DES PLANS DE MELANGES POUR L'ÉTUDE DE L'EFFET DE L'AJOUT DE CALCAIRE ET DE SABLE DE DUNE BROYÉS SUR LE COMPORTEMENT PHYSICO-MÉCANIQUES DES BÉTONS À HAUTES PERFORMANCES

Dans cette partie on présente les résultats d'un programme expérimental dans lequel l'approche des plans de mélanges a été utilisée afin d'optimiser des BHP formulés à base de matériaux locaux de la région de Laghouat (Algérie).

Par ailleurs, un plan de mélange à 3 facteurs a été utilisé afin de modéliser l'influence du dosage en ciment ainsi que des dosages des deux additions sur les propriétés d'un béton à hautes performances. Des modèles mathématiques expliquant au mieux les résultats d'essais ont été déterminés et développés dans ce travail. La modélisation a été réalisée grâce à un logiciel d'analyse statistique JMP7 de Statistical American Systems SAS-Istitute.

B) DANS LA DEUXIÈME PARTIE ON ÉTUDIE :

L'EFFET DE L'AJOUT DE CALCAIRE ET DE SABLE DE DUNE BROYÉ SUR LA DURABILITÉ DES BÉTONS À HAUTES PERFORMANCES

L'expression durabilité du béton est généralement utilisée pour caractériser de façon générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique.

Les essais que nous entreprenons dans cette partie, consistent à suivre le comportement à long terme des certaines compositions de béton, conservées dans des milieux plus ou moins agressifs ou soumis à des cycles « immersion /séchage ».

Les travaux de cette partie ont pour but d'étudier l'effet des additions minérales (SDB, FC) sur la résistance aux attaques chimiques des BHP et essayer d'apporter une contribution à la compréhension des principaux mécanismes d'action de ces additions incorporées dans les BHP vis-à-vis des attaques de milieux acides et sulfatiques.

La durabilité de ces bétons dans les différents milieux est quantifiée par l'évolution de la résistance mécanique, la variation de la masse et le changement de longueur.

II.5. CONCLUSION

Ce chapitre a compris deux grandes parties : une première partie consacrée à la caractérisation des matériaux de base (ciment, sable, SDB, FC, superplastifiant et eau de gâchage) et une deuxième partie consacrée à la présentation des techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation des BHP.

~~— Ces matériaux mis à notre disposition ont leurs propriétés conformes aux normes en vigueur et conviennent parfaitement à notre objectif notamment la formulation des bétons à hautes performances.~~

L'approche des plans d'expériences peut prendre en considération toutes les interactions possibles entre les effets des constituants et permet d'établir l'ordre d'importance des paramètres sur les propriétés étudiées.

L'étape suivante sera consacrée à l'optimisation de la formulation de ce type de béton où nous allons présenter les résultats d'un programme expérimental dans lequel l'approche des plans d'expériences sera utilisée afin de comprendre le rôle joué par les différents paramètres étudiés sur les propriétés de béton à hautes performances.

Chapitre III

Optimisation de la formulation du BHP par une modélisation " plan de mélange"

III.1. INTRODUCTION

La méthode des plans d'expériences est une méthodologie puissante qui permet grâce à une approche statistique, de conduire un nombre bien déterminé d'essais et d'avoir des résultats permettant de dévoiler l'effet de chaque paramètre étudié séparément et en interactions avec d'autres paramètres.

Ce chapitre a comme objectif principal de montrer la faisabilité d'utiliser les approches expérimentales basées sur les plans d'expériences pour établir une modélisation des réponses obtenues en fonction des paramètres de l'étude.

La modélisation a été réalisée grâce à un logiciel d'analyse statistique JMP7 de Statistical American Systems SAS-Istitute.

Ce logiciel JMP7 qui accompagne notre recherche est la version la plus récente du logiciel des plans d'expériences, édité par SAS (Statistical American Systems). Il permet de réaliser facilement les calculs et de tracer les diagrammes des exemples d'applications présentés.

III.2. LES PLANS D'EXPERIENCES

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [114]. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, 'y' et des variables, 'x_i'. En général, il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$Y = f(x_i) \quad (III.1)$$

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur [115].

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

Par ailleurs, les facteurs d'étude des plans de mélanges sont les proportions des constituants du mélange [116]. Or, ces constituants ne sont pas indépendants les uns des autres. La somme des proportions d'un mélange est toujours égale à 100%. Le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés. C'est la raison pour laquelle les plans de mélanges sont traités à part.

Les plans de mélanges sont aussi caractérisés par de nombreuses contraintes qui peuvent peser sur le choix des proportions des constituants. Par exemple, la concentration d'un produit doit être au moins de 'x' pour-cent où cette concentration ne peut excéder une valeur donnée. En fonction de ces contraintes la planification de l'étude est modifiée et elle doit être adaptée à chaque cas.

Si l'on note par 'x_i' la teneur en constituant 'i', la somme des teneurs de tous les constituants du mélange satisfait la relation :

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = 100\% \quad (III.2)$$

Si, au lieu d'utiliser les pourcentages, on ramène la somme des teneurs des différents constituants à l'unité on a :

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = 1 \quad (III.3)$$

Cette relation s'appelle la contrainte fondamentale des mélanges. Les représentations géométriques des plans de mélanges sont différentes de celles utilisées pour les plans d'expériences classiques et les modèles mathématiques sont eux aussi profondément modifiés.

Pour la représentation géométrique des mélanges à (03) composants, on utilise un triangle équilatéral (Figure III.1).

Les produits purs sont aux sommets du triangle équilatéral (A, B ou C). Les mélanges binaires sont représentés par les cotés du triangle (AB, BC ou AC). Par exemple, le côté AB du triangle (Figure III.1) représente les mélanges composés uniquement des produits A et B.

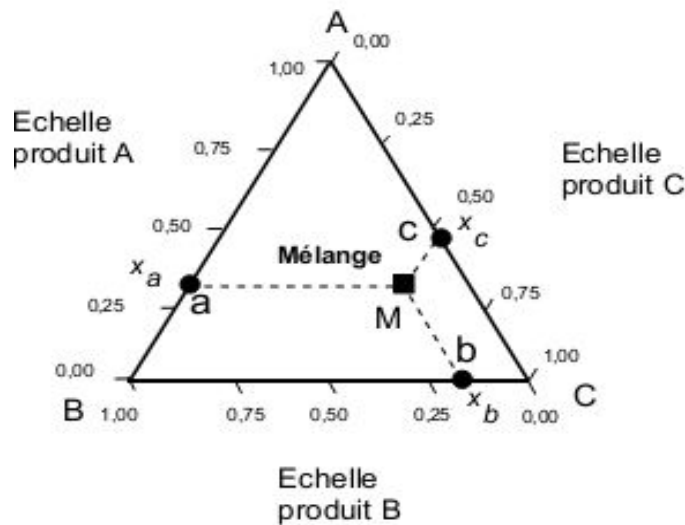


Figure III.1. Représentation des mélanges à (03) constituants sur un triangle équilatéral [115].

Un point (M) de la surface intérieure du triangle équilatéral représente un mélange ternaire. Les compositions de chaque produit se lisent sur les côtés du triangle. Les propriétés géométriques du triangle équilatéral assurent que la contrainte fondamentale des mélanges est bien respectée.

III.3. FORMULATION DE LA COMPOSITION DE BASE

Dans ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement au béton à hautes performances de la classe I qui a une résistance à la compression comprise entre 50 et 75 MPa.

Notre programme expérimental a permis de comprendre le rôle joué par les différents paramètres séparément (dosage en ciment, en sable de dune broyé et en filler calcaire) sur les propriétés de béton à hautes performances.

Ainsi, nous aurons à traiter un plan de mélange à 3 facteurs (C, SDB et FC) pris en proportions massiques, dont la somme est égale à l'unité avec une substitution du ciment qui va jusqu'à 25% (125 kg de ciment) (Figure III.2) ; ce qui veut dire que ces facteurs sont dépendants les uns des autres. Le domaine expérimental est donc contraint par la relation suivante:

$$\% C + \% SDB + \% FC = 100 \quad (III.4)$$

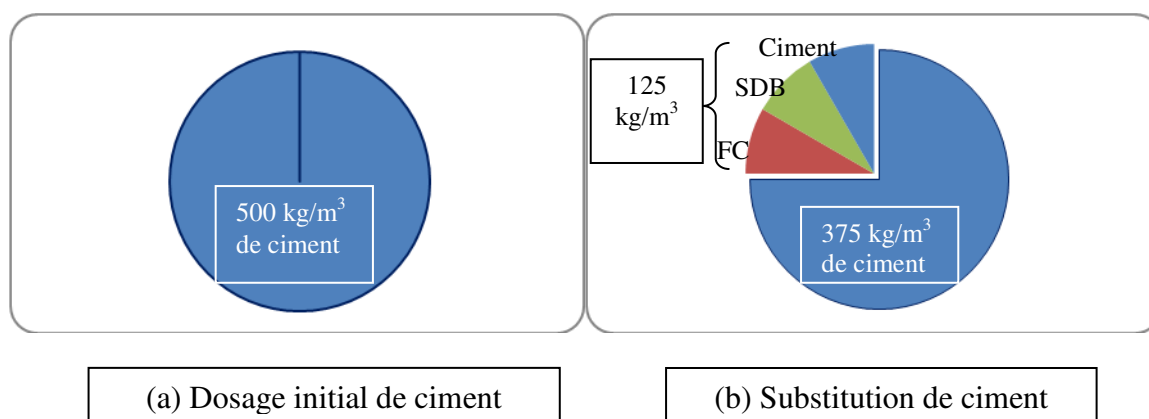


Figure III.2. Substitution de ciment par des ajouts de minéraux.

Le nombre d'expériences générés par le logiciel est calculé par la relation suivante :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q+m-1)!}{(m)!(q-1)!} \quad (III.5)$$

où :

'q' est le nombre de facteurs, et 'm' le nombre de niveaux.

Avec 3 facteurs et 5 niveaux, un plan de mélange comprenant 21 compositions a été préparé pour évaluer l'influence de ces trois facteurs sur les caractéristiques du BHP étudié.

Le modèle à priori s'écrit sous la forme $Y = f(x_i)$ où la fonction 'f' est un développement polynomial d'ordre plus ou moins élevé des 'x_i', l'ordre du polynôme dépend du degré de précision souhaité. Dans cette étude, un modèle polynomial d'ordre 03 a été utilisé à trois variables non indépendants (dosage de ciment, SDB et FC) et 05 niveaux. Le modèle est exprimé comme suit:

$$Y = a_1 \times C + a_2 \times SDB + a_3 \times FC + a_4 \times (C.SDB) + a_5 \times (C.FC) + a_6 \times (SDB.FC) \quad (III.6)$$

Ou :

Y est la réponse et $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6)$ sont les coefficients du modèle qu'il faut identifier et expriment l'effet de la réponse à chaque facteur et à chaque interaction.

La figure III.3 représente un réseau triangulaire des 21 combinaisons étudiées :

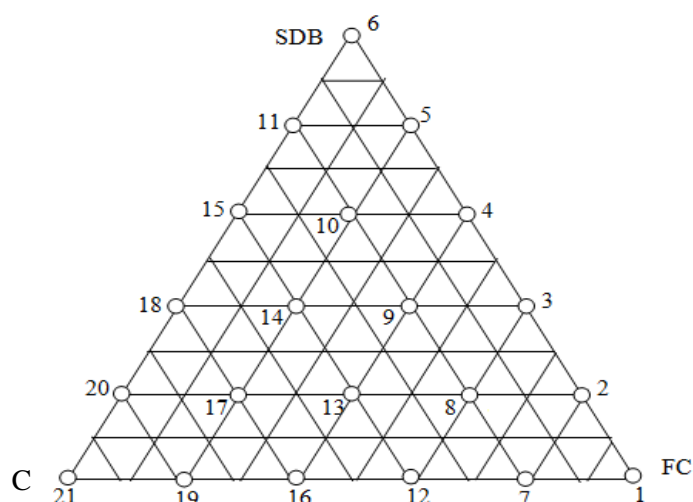


Figure III.3. Représentation triangulaire des 21 combinaisons étudiées à trois constituants.

Les proportions de ces facteurs d'expérience générés par le logiciel sont présentées dans le tableau III.1.

Tableau III.1. Proportions des facteurs dans les compositions étudiées.

N°	Ciment	SDB	FC
1	0	0	1
2	0	0,2	0,8
3	0	0,4	0,6
4	0	0,6	0,4
5	0	0,8	0,2
6	0	1	0
7	0,2	0	0,8
8	0,2	0,2	0,6
9	0,2	0,4	0,4
10	0,2	0,6	0,2
11	0,2	0,8	0
12	0,4	0	0,6
13	0,4	0,2	0,4
14	0,4	0,4	0,2
15	0,4	0,6	0
16	0,6	0	0,4
17	0,6	0,2	0,2
18	0,6	0,4	0
19	0,8	0	0,2
20	0,8	0,2	0
21	1	0	0

Dans notre cas les réponses souhaitées sont l'affaissement au cône d'Abrams, la résistance à la compression et la résistance à la flexion.

Les résultats obtenus des réponses sont ensuite injectés dans le logiciel "JMP7". Ils sont représentés par des diagrammes ternaires reliant les constituants de la matrice, à savoir le ciment, le sable de dune broyé et les fillers calcaires, avec les réponses étudiés et qui ont fait ressortir les constituants prépondérants de la matrice. Les mêmes diagrammes nous ont permis aussi d'optimiser la composition de référence des BHP.

La méthode utilisée pour la détermination de la composition de base est celle de la formulation des BHP de l'université de Sherbrooke [9]. Cette méthode permet de formuler des BHP sans air entraîné, et suit le même principe de la norme [ACI 211. 1-91, 1991].

On utilise aussi pour la préformulation du BHP, la méthode de formulation des bétons ordinaire de Dreux corrigée [30] pour la détermination de la composition granulaire des gros granulats. C'est une méthode simple à utiliser pour connaître les proportions granulaires, car elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats.

La composition de base de notre travail est maintenue constante pendant tous les essais par la suite, sauf pour le contenu du liant qui est composé d'un mélange ternaire variable (ciment blanc de type CEM II/A 52.5, fillers calcaires de nature dolomitique (FC) et sable de dune broyé (SDB).

Tous les mélanges ont été donc élaborés en se basant sur ces trois composants, issus par l'utilisation du logiciel de statistique JMP7 en utilisant un mélange ternaire du liant.

Les dosages des classes granulaires (3/8) et (8,16) ont été respectivement de 25% et 75% du volume total des gros granulats. Le dosage en sable a été ajusté pour les différentes formulations afin d'obtenir un mètre cube de béton d'après les formules suivantes :

$$V_{p\grave{a}te} = V_{ciment} + V_{fines} + V_{gros\ granulat} + V_{eau} + V_{adjuvant} + V_{air} \quad (III.7)$$

$$V_{granulats\ fins} = 1000 - V_{p\grave{a}te} \quad (III.8)$$

Les compositions ainsi obtenues sont résumées dans le tableau III.2 selon leurs ordres de préparations dans le laboratoire après la randomisation des essais.

Tableau III.2. Formulations des mélanges selon un plan de mélange.

Mélanges N°	Ciment [kg/m ³]	SDB [kg/m ³]	FC [kg/m ³]	G (3/8) [kg/m ³]	G(8/16) [kg/m ³]	Eau [l/m ³]	E/L	Sp [L]	Sable [kg/m ³]
BHP1	375	0	125	262,5	787,5	150	0,3	10	720,92
BHP2	375	25	100						720
BHP3	375	50	75						719,08
BHP4	375	75	50						718,16
BHP5	375	100	25						717,25
BHP6	375	125	0						716,33
BHP7	400	0	100						724,14
BHP8	400	25	75						723,22
BHP9	400	50	50						722,3
BHP10	400	75	25						721,38
BHP11	400	100	0						720,46
BHP12	425	0	75						727,35
BHP13	425	25	50						726,44
BHP14	425	50	25						725,52
BHP15	425	75	0						724,6
BHP16	450	0	50						730,57
BHP17	450	25	25						729,65
BHP18	450	50	0						728,73
BHP19	475	0	25						733,8
BHP20	475	25	0						732,87
BHP21	500	0	0						737

III.4. EXPLOITATION DES RESULTATS DU PLAN DE MELANGE

Les résultats des 21 mélanges, statistiquement équilibrés avec les trois facteurs (C : Ciment, SDB : Sable de Dune Broyé, FC : Fillers Calcaires) peuvent bien exploiter les 21 compositions dans l'élaboration des modèles mathématiques décrivant l'effet de type d'ajout sur les propriétés des BHP. Ces modèles ont facilité la visualisation de l'effet de chaque ajout séparément et en combinaison avec d'autres types d'ajout sur les propriétés des BHP, par des diagrammes ternaires avec des courbes iso-réponses.

Les résultats obtenus lors des essais sont recueillis dans le tableau III.3.

Tableau III.3. Résultats des essais de caractérisation.

Mélanges N°	Affaissement (cm)	Résistance mécanique (MPa)			
		à 7 jours		à 28 jours	
		R _f	R _C	R _f	R _C
BHP1	7,5	3,18	34,17	3,71	49,12
BHP2	8	3,27	35,15	3,78	50,08
BHP3	7,5	3,21	35,04	3,7	44,95
BHP4	8,5	3,14	33,49	3,68	46,04
BHP5	9	3,11	31,87	3,74	48,41
BHP6	8,5	3,09	32,22	3,66	47,49
BHP7	8,5	3,49	38,67	3,9	54,72
BHP8	10	3,37	38,51	4	55,26
BHP9	9	3,5	40,12	3,98	58,03
BHP10	9	3,3	36,25	3,81	52,01
BHP11	10	3,40	37,52	3,87	56,94
BHP12	10,5	3,66	43,51	4,23	58,68
BHP13	12,5	3,67	44,25	4,23	64
BHP14	10,5	3,41	39,83	3,92	60,71
BHP15	9,5	3,52	40,75	4,13	62,88
BHP16	14	4,08	45,42	4,6	67,02
BHP17	12	4,22	49,51	4,71	73,19
BHP18	11	3,82	46,22	4,38	71,46
BHP19	13	3,92	47,04	4,45	65,57
BHP20	10,5	3,76	41,67	4,31	68,43
BHP21	9	3,53	42,18	4,15	61,17

Une analyse de la variance permet de dissocier les différents effets étudiés à partir de la variance de la réponse mesurée et permet aussi de voir qu'elle est la contribution des facteurs à la variabilité de la réponse.

La validité des modèles peut être testée par la méthode statistique se basant sur le calcul des erreurs issues de l'expérimentation et du modèle.

La majorité des modèles adaptés ont présenté des coefficients de corrélation relativement élevés. Ceci montre une bonne corrélation entre les réponses obtenues par les simulations et les valeurs prédites par le modèle ainsi trouvé. Les coefficients issus de la modélisation, les coefficients de corrélation (R^2) et les probabilités *p-value* des réponses sont regroupés dans le Tableau III.4.

Tableau III.4. Coefficients et paramètres d'estimation des modèles des réponses étudiées

a_6 (SDB*FC)	a_5 (C*FC)	a_4 (C*SDB)	a_3 (FC)	a_2 (SDB)	a_1 (C)	coeff	Méthodes d'analyse statistique	P	R ²	Réponses
1,48	15,92	3,42	6,69	8,65	10,20	coeff	Pas-à-pas	P=0,0001	R ² =0,78	Affaissement
0,6498	0,0002*	0,3035	<,0001*	<,0001*	<,0001*	p-value				
NS	15.67	3.17	6.88	8.85	10.20	coeff	Criblage			
0,11	1,76	1,10	3,15	3,05	3,70	coeff	Pas-à-pas	P<0,0001	R ² =0,81	R _{f 7j}
0,8347	0,0052*	0,0592	<,0001*	<,0001*	<,0001*	p-value				
NS	1.74	1.08	3.17	3.07	3.70	coeff	Criblage			
0,07	1,81	0,91	3,60	3,64	4,29	coeff	Pas-à-pas	P<0,0001	R ² =0,84	R _{f 28j}
0,8881	0,0025*	0,0871	<,0001*	<,0001*	<,0001*	p-value				
NS	1.80	0.90	3.61	3.65	4.29	coeff	Criblage			
4,92	27,13	21,99	33,81	31,30	43,12	coeff	Pas-à-pas	P<0,0001	R ² =0,89	R _{c 7j}
0,4686	0,0009*	0,0046*	<,0001*	<,0001*	<,0001*	p-value				
NS	26.31	21.17	34.47	31.95	43.12	coeff	Criblage			
-3,45	30,30	48,90	48,41	46,25	63,93	coeff	Pas-à-pas	P<0,0001	R ² =0,91	R _{c 28j}
0,7299	0,0088*	0,0002*	<,0001*	<,0001*	<,0001*	p-value				
NS	30.89	49.49	47.94	45.77	63.93	coeff	Criblage			

NS : Influence Non Significative

III.4.1. RÉSISTANCE A LA COMPRESSION

La résistance à la compression est la plus importante des propriétés d'usage du matériau, c'est aussi celle dont l'amélioration est la plus spectaculaire.

Néanmoins, la résistance mécanique est généralement une caractéristique souvent utilisée pour classer les BHP et un avantage majeur de ces bétons par l'obtention de hautes résistances.

Les modèles statistiques dérivés pour la résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours sont résumés ci-dessous avec des variables exprimées en valeurs codés. Les modèles reflètent la signification relative de chaque paramètre sur la réponse étudiées (la résistance à la compression).

Résistance à la compression (7 jours) : $43.1269 * \text{Ciment} + 31.9582 * \text{SDB} + 34.4737 * \text{FC} + \text{Ciment} * (\text{SDB} * 21.1721) + \text{Ciment} * (\text{FC} * 26.3120)$

Résistance à la compression (28 jours) : $63.9385 * \text{Ciment} + 45.7778 * \text{SDB} + 47.9421 * \text{FC} + \text{Ciment} * (\text{SDB} * 49.4955) + \text{Ciment} * (\text{FC} * 30.8973)$

A partir du modèle dérivé de résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours, on constate que la résistance à la compression est conditionnée d'abord par l'accroissement de la teneur en ciment, suivie par l'effet couplé de ciment et de sable de dune broyé, ensuite la teneur en fillers calcaires et puis l'effet couplé de ciment et de fillers calcaires.

On remarque aussi que les résistances mécaniques se développent dans les premiers jours de l'hydratation plus rapidement pour tous les BHP étudiés. En effet, le BHP témoin (BHP 21) atteint à 7 jours plus de 68% de sa résistance à la compression à 28 jours.

Les résistances à la compression des BHP avec SDB/FC développent un taux qui varie de 60% à 78% suivant le pourcentage de substitution.

Les effets combinés de l'ajout de SDB et de FC offrent au béton à hautes performances un comportement mécanique amélioré selon le taux de substitution du ciment.

Les dosages des trois facteurs présentent des valeurs optimales (aux environs de 60% de ciment, 20% de SDB et de 20% FC en volume et en substituant 125 kg sur 500 kg de ciment) pour lesquelles la résistance à la compression atteint une valeur maximale. Cela traduit le rôle chimique joué par le SDB à long terme, et confirme donc l'activité pouzzolanique du SDB [11,118,119]. Au-delà de 7 jours, le ciment libérant de la chaux au cours de son hydratation, le SDB fixe la chaux pour former de nouveaux silicates qui permettent aux bétons des augmentations sensibles de leurs résistances au cours du temps.

Ainsi, la résistance optimale est traduite par le rôle physique joué par le FC qui offre une amélioration de la compacité des bétons à hautes performances. Le FC peut changer la structure des pores, faire diminuer le nombre de pores [120]. Ce changement est fonction de la finesse, plus les particules sont fines, plus leur rôle est efficace [121].

Une diminution de la résistance à la compression est observée quand le pourcentage de substitution du ciment par les ajouts augmente qui peut être expliquée par le constat suivant : après une substitution élevée, la quantité de ciment diminue, les produits résultants diminuent, par conséquent, la quantité de $\text{C}_a(\text{OH})_2$ avec qui le SDB rentre en réaction diminue, d'où on a comme résultat une diminution de la quantité du C-S-H [122].

A partir des résultats obtenus des essais de compression, on a pu construire des graphiques ternaires présentant les effets des 03 constituants sur la réponse étudiée (figure III.4).

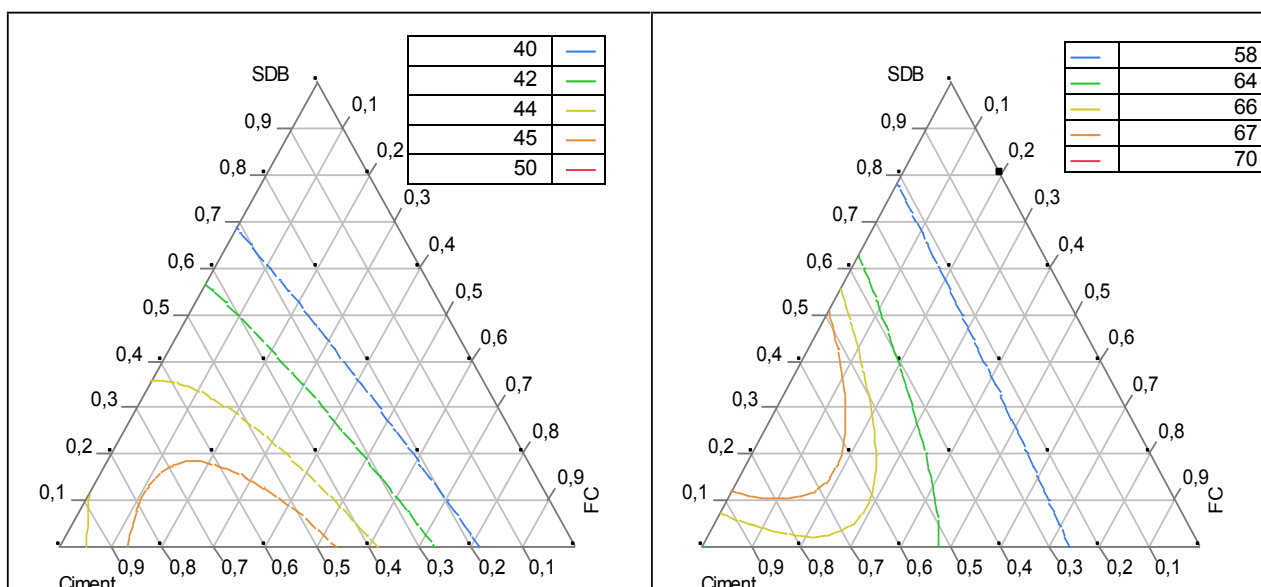


Figure III.4. Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours.

III.4.2. RESISTANCE A LA FLEXION

Comme pour le modèle de la résistance à la compression, nous retenons pour les modèles de la résistance à la flexion à 7 jours et 28 jours que les facteurs qui sont très significatifs ; les modèles s'écrivent alors :

$$\text{Résistance à la flexion (7 jours)} : 3.7083 * \text{Ciment} + 3.0748 * \text{SDB} + 3.1736 * \text{FC} + \text{Ciment} * (\text{SDB} * 1.0820) + \text{Ciment} * (\text{FC} * 1.7413).$$

$$\text{Résistance à la flexion (28 jours)} : 4.2971 * \text{Ciment} + 3.6530 * \text{SDB} + 3.615 * \text{FC} + \text{Ciment} * (\text{SDB} * 0.901785714285726) + \text{Ciment} * (\text{FC} * 1.8005)$$

Similairement au cas précédent, les valeurs de la résistance à la flexion sont influencées par le pourcentage de SDB et de FC en substitution au ciment.

Le modèle statistique dérivé de la résistance à la flexion montre clairement qu'elle est régie par la teneur en ciment qui joue un rôle important en s'hydratant et qui a un effet positif sur l'amélioration de la résistance à la flexion, suivi des ajouts utilisés qui mènent de manière significative à une augmentation de la résistance à la flexion. Cela s'explique par le fait que la finesse favorise l'effet physique de la fine calcaire et l'addition de sable de dune broyé conduit à la formation d'un supplément de CSH apportant ainsi une contribution supplémentaire à la résistance des mélanges substitués.

Le modèle montre aussi, qu'au-delà de 5% de SDB et de 5% de FC en volume total de ciment, l'accroissement du dosage en SDB et en FC est néfaste pour la résistance à la flexion. Il montre ainsi que les couples C*FC ont une grande influence sur la réponse étudiées en comparaison avec les couples C*SDB.

A 28 jours, le béton avec 5% de SDB et 5% FC(BHP17) développe la plus grande résistance à la flexion (4,71 MPa) suivi par le béton BHP16 avec 10% de FC (4,7 MPa) et le béton témoin BHP21 (4,15MPa) ; puis les résistances diminuent avec l'augmentation du pourcentage de SDB et de FC. La résistance la plus faible est développée par le béton avec 25% de SDB en poids de ciment, elle est de 3,66MPa.

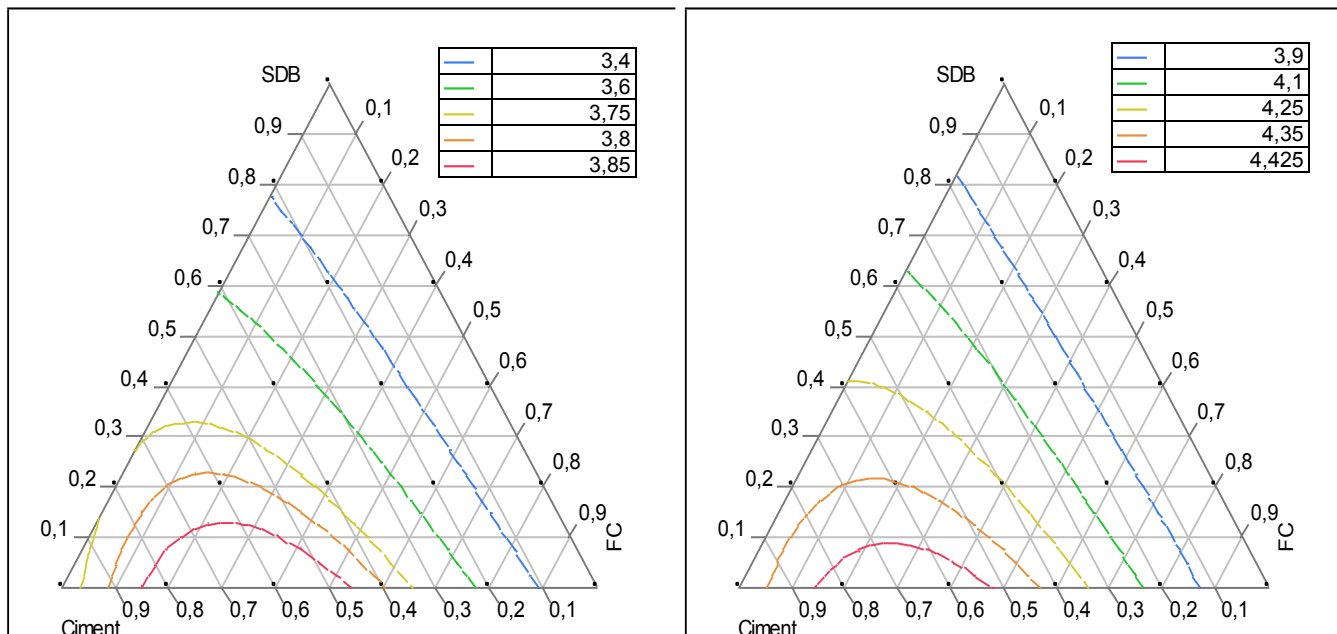


Figure III.5. Courbes iso-réponses de la résistance à flexion à 7 jours et à 28 jours.

III.4.3. MODELISATION DE L'AFFAISSEMENT

La maniabilité est la qualité essentielle du béton permettant la facilité de sa mise en place. Grâce à l'essai d'ouvrabilité tel que l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, on peut évaluer la plasticité du béton qui est une condition nécessaire pour évaluer la maniabilité.

Le modèle mathématique retenu pour l'affaissement est :

$$\text{L'affaissement (cm)}: 10.2023 * \text{ciment} + 8.8531 * \text{SDB} + 6.8888 * \text{FC} + \text{ciment} * (\text{SDB} * 3.1746) + \text{ciment} * (\text{FC} * 15.6746)$$

A partir du modèle statistique dérivé de l'affaissement au cône d'Abrams, il est clair que les paramètres d'étude ont une influence sur l'affaissement comme l'indique les coefficients de chaque paramètres et donnent des valeurs satisfaisantes pour l'ouvrabilité.

Les valeurs de l'affaissement mesurées par le cône d'Abrams des différents bétons optimisés sont données dans le tableau 7 et représentées graphiquement sous formes de diagrammes ternaires dans la figure III.6 qui illustre mieux les effets des trois facteurs étudiés.

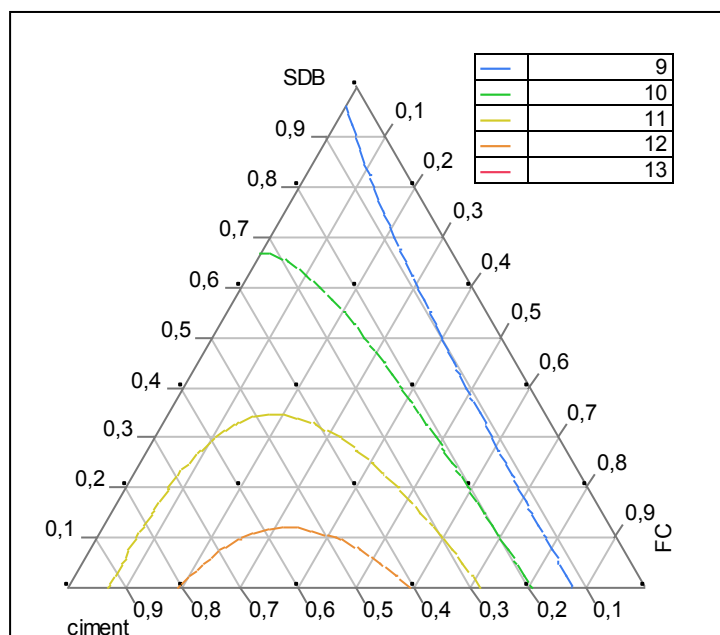


Figure III.6. Courbes iso-réponses de l'affaissement.

D'après le profileur de prévision de l'affaissement (figure III.7) qui a permis d'établir des courbes ayant pour but de faciliter l'interprétation et de permettre une meilleure analyse, on constate que la présence du calcaire améliore la maniabilité (au cône d'Abrams) des bétons testés à l'état frais, notamment pour le dosage de 40% de FC et de 0% SDB et que l'affaissement des bétons avec l'ajout des fillers calcaires (FC) et de sables de dunes broyés augmente sensiblement par rapport au béton de référence (BHP 21).

Cela est peut être dû aux ajouts utilisés qui sont finement broyés. Ces derniers remplissent les pores et libèrent l'eau emprisonnée.

Mais à un taux élevé de fillers calcaires, on constate que ces fillers ont une influence négative sur l'affaissement. Le BHP sans ajouts présente un affaissement supérieur à ceux du BHP avec fillers en taux élevé ; cela prouve que le taux important de fillers accroît sensiblement la demande en eau. En effet, plus la teneur en fillers augmente, plus la demande en eau nécessaire pour mouiller toute la surface spécifique est importante [121].

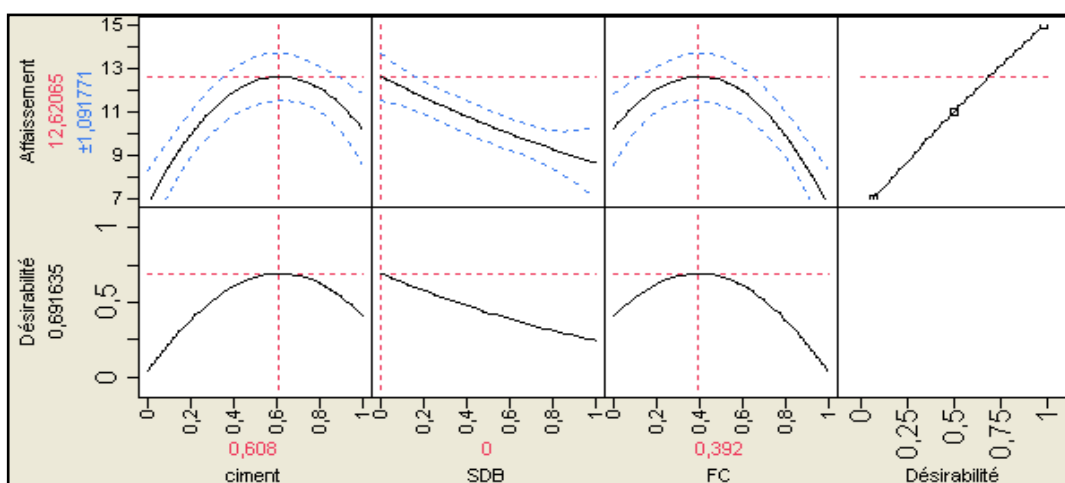


Figure III.7. Profileur de prévision de l'affaissement en fonction de ciment, SDB et FC

III.5. CONCLUSION

Le présent chapitre avait pour objet l'étude de l'effet de la substitution partielle du ciment par des fines siliceuses (sable de dune finement broyé (SDB)) et des fines calcaires (Tamisât de déchet de concassage (FC)) sur les propriétés des BHP en utilisant l'approche des plans d'expérience.

Les résultats obtenus montrent que l'introduction de l'addition calcaire (FC) et de l'addition siliceuse (SDB) dans le ciment (en substitution) conduit à une amélioration considérable des résistances mécaniques à moyen et long terme. Il apparaît notamment que la résistance mécanique augmente avec le pourcentage d'additions jusqu'à un optimum (5% de SDB et 5% de FC) puis diminue pour des pourcentages plus grands.

Les résultats obtenus montrent que les modèles dérivés et basés sur l'approche des plans d'expériences se sont révélés intéressants pour comprendre les interactions entre les différents paramètres étudiés du mélange (quantité de ciment, quantité de SDB et quantité de FC).

Chapitre IV

Durabilité des BHP vis-à-vis des milieux agressifs

IV.1. INTRODUCTION

La durabilité peut être définie comme l'aptitude du béton à résister à des influences externes différentes telles que : le feu, attaques chimiques, conditions d'environnement (conditions climatiques), etc.

Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton. Les différentes altérations observées sont d'ordre chimique ou physique [31].

- Les altérations chimiques sont dues essentiellement aux acides, aux bases et aux solutions salines; elles entraînent presque toujours la dissolution de la chaux et le plus souvent, en association avec cette dissolution, la formation de nouveaux composés [123].
- Les altérations physiques sont dues à des surcharges, à des sollicitations excessives aux frottements, aux chocs thermiques, aux gonflements ou aux retraits. Elles entraînent l'érosion et la fissuration du béton [39].

Ce chapitre, nous permet de montrer, d'une part l'effet de l'ajout de sable de dune broyé (SDB) (comme addition partiellement active), et d'autre part l'effet des fines calcaires (FC) (comme addition inerte) sur la résistance de bétons à hautes performances vis-à-vis de différents milieux agressifs. Un mode opératoire approprié a été utilisé: il s'agit d'une série de cycles « immersion-séchage » (procédure décrite au chapitre II), qui a pour but d'accélérer le vieillissement pour bien apprécier le degré de dégradation qui en résulte.

Les bétons choisis pour cette partie d'étude sont ceux définis dans le chapitre précédent :

- le BHP16 qui est dosé à 450 kg de ciment et 50 kg de FC (soit 10%) par mètre cube;
- le BHP17 qui est dosé à 450 kg de ciment, 25 kg de SDB (soit 5%) et 25 kg de FC (soit 5 %) par mètre cube;
- le BHP21 qui est dosé à 500 kg de ciment par mètre cube (béton de référence) ;

IV.2. RÉSULTATS ET COMMENTAIRES

Afin d'évaluer la résistance chimique des différents BHP étudiés envers l'attaque des agents agressifs, différents essais de durabilité ont été menés. Les éprouvettes sujettes à ces essais ont été conservées dans des bacs en plastique contenant séparément, de l'eau saturée en chaux, une solution de 10 % de $MgSO_4$ et une solution de 3 % d'HCl. Cette opération est effectuée après 28 jours de cure dans une eau saturée en chaux.

Quatre mesures différentes ont été effectuées sur les spécimens de bétons conservés dans les différents milieux; ces mesures concernent:

- l'évolution de la masse des éprouvettes à 14, 28, 90 et 180 jours ;
- l'évolution de la longueur des éprouvettes à la fin de chaque cycle de vieillissement pour les trois milieux de conservation ;
- l'évaluation de la résistance à la compression à 28, 90 et 180 jours ;
- l'évaluation de la résistance à la flexion à 28, 90 et 180 jours.

IV.2.1. VARIATION DE MASSE

IV.2.1.1 ACTION DE L'EAU SATURÉE EN CHAUX

La figure IV.1 montre l'évolution de la variation de masse des éprouvettes des différents bétons étudiés (BHP16, BHP17 et BHP21) en fonction de la durée de conservation dans l'eau saturée en chaux tout au long des cycles immersion-séchage.

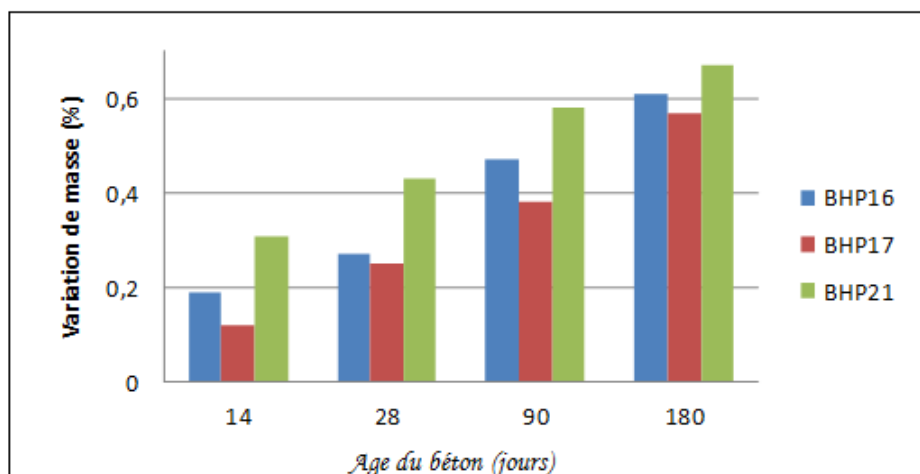


Figure IV.1. Variation de masse en fonction de la période des cycles d'immersion-séchage dans l'eau saturée en chaux.

On constate que tous les bétons présentent un gain de masses. Ce gain évolue d'une manière régulière pour tous les bétons en fonction de la durée d'immersion jusqu'à 180 jours.

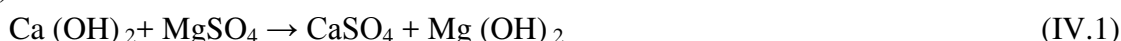
L'accroissement progressif de gain en masse est attribué à la continuité régulière de la formation d'hydrates dans les différents BHP, grâce à la présence de la chaux dans l'eau qui contribue à la poursuite régulière des réactions d'hydratation et également à la formation de nouveaux produits rendant le matériau plus dense [110].

Les BHP avec ajout de SDB et FC présentent des gains moins importants que celui du BHP témoin (BHP21). On note que les taux de gain en masse sont de 0,61 %, 0,57 % et 0,67 % respectivement pour le BHP 16, le BHP17 et le BHP21 à l'âge de 180 jours. Cela peut être attribué à la réduction de la quantité de la portlandite suite à la réaction pouzzolanique en engendrant la réduction de la quantité de calcite formée dans les éprouvettes des bétons avec ajout (BHP16, BHP17).

IV.2.1.2. ACTION DE SULFATE DE MAGNÉSIUM ($MgSO_4$)

Le sulfate de magnésium est très agressif, ceci est dû à sa double action qui se traduit par :

a) Formation de la brucite :

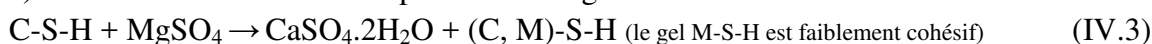


La brucite ($Mg(OH)_2$) est caractérisée par une faible solubilité et un pH faible.

b) Formation de l'ettringite secondaire à partir du C_3A anhydre résiduel :



c) Substitution des ions Ca^{++} par les ions Mg^{++} dans les C-S-H :



La figure IV.2 montre la variation de masse des BHP16, BHP17 et BHP21 en fonction des cycles immersion-séchage dans la solution de $MgSO_4$ de 10 % de concentration.

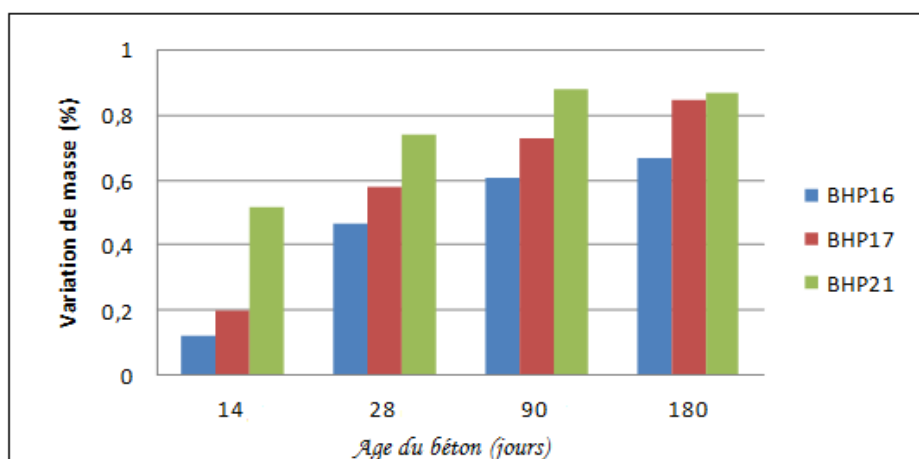


Figure IV.2. Variation de masse des bétons conservés dans la solution de $MgSO_4$.

D'après la figure IV.2, on constate une évolution de la variation de masse de tous les BHP en fonction de la durée d'immersion-séchage jusqu'à 180 jours dans la solution de 10 % de sulfate de magnésium.

L'évolution se traduit par l'apparition de phases minéralogiques expansives dans le matériau durci tels que le gypse, l'étringite secondaire et la brucite, susceptibles de faire gonfler la pâte de ciment [124,125].

Pour toutes les échéances, la variation de masse du BHP16 contenant 10% de FC est inférieure à celle des BHP21 témoin. Une légère augmentation de l'expansion a été observée dans le cas du BHP17 comparée à celle du BHP16 pour les échéances 14, 28 et 90 jours ; celle-ci peut être expliquée par le calcaire contenu dans le BHP17 qui est probablement capable d'accélérer l'attaque de sulfate de magnésium [126].

La différence de gain de masse entre le BHP16 et le BHP17 est probablement due à la variation de la quantité de la portlandite dans les deux bétons. Elle se dissout dans le cas de présence de matériaux siliceux [127] et elle est piégée sous forme de brucite, dans le cas de présence de matériaux calcaire [124,125].

Pour le BHP21 sans ajout (BHP de contrôle) et le BHP17 contenant 5% de SDB et 5% de FC, l'expansion après 180 jours d'immersion-séchage dans la solution de $MgSO_4$ est de 0,87 % et de 0,85% respectivement, dont les valeurs sont très voisines. Par contre, le BHP16 présente une réduction de l'expansion après 180 jours de l'ordre de 0,67%.

L'expansion dans le BHP16 après 28 et 90 jours était de 0,47% et 0,61% respectivement, ce qui permet de conclure que l'utilisation de l'ajout du SDB et du FC ont réduit l'expansion par rapport au BHP de contrôle et retardent l'attaque du sulfate de magnésium.

En outre, l'augmentation du poids des BHP soumis aux cycles immersion-séchage dans la solution de $MgSO_4$ peut être expliquée par la formation de produits supplémentaires. L'attaque du béton par les sulfates résulte d'une réaction chimique qui se produit en présence d'eau entre les ions sulfates et l'aluminate de calcium (C_3A) de la pâte de ciment durcie. Les produits qui résultent de ces réactions sont le trisulfoaluminate de calcium communément

appelé « Ettringite » [127] et le sulfate de calcium hydraté mieux connu sous le nom de « gypse ».

Dès que les cristaux en aiguilles de l'ettringite secondaire n'ont plus de place pour croître dans les pores, une pression de cristallisation se produit, ce qui entraîne l'expansion et, finalement, l'éclatement de la surface du béton.

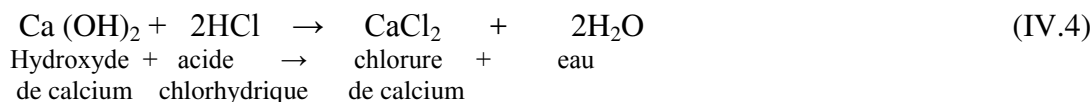
Récemment, la formation de thaumasite a été reconnue comme mécanisme entraînant des dégâts. La thaumasite est également un produit expansif [128], qui est dû à la réaction de la pâte de ciment durcie avec les ions de sulfate. Elle s'écrit sous la forme : $CaO.SiO_2.CaSO_4CaCO_3.14H_2O$ (thaumasite).

Finalement, on peut également conclure que l'incorporation des additions minérales comme le SDB et le FC dans les BHP conduit à une diminution de l'expansion des BHP immergés dans la solution de 10 % de $MgSO_4$, en raison de la diminution de la quantité des aluminates tricalciques C_3A dans le ciment. Ces aluminates sont très sensibles à l'attaque par les sulfates [129].

IV.2.1.3. ACTION DE L'ACIDE CHLORHYDRIQUE

L'acide chlorhydrique (HCl) est un acide inorganique qui est plus nuisible pour les bétons et mortiers que les acides organiques.

Les acides inorganiques forment avec le $Ca(OH)_2$ contenu dans la pâte de ciment durcie des composés facilement solubles dans l'eau. L'acide chlorhydrique est l'acide utilisé dans la présente étude. La réaction chimique se fait comme suit :



On peut donc établir qu'un acide est autant plus nuisible lorsque les sels de calcium formés sont plus facilement solubles.

Par ailleurs, les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium, ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie, en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [130].

La concentration de l'HCl a également son effet sur le degré de dégradation, elle est souvent choisie dans la littérature. L'utilisation de faibles concentrations demanderait plus de temps d'investigation. C'est pourquoi le choix s'est porté sur celle de 3 % qui représente un seuil pour un milieu agressif.

La figure IV.3 montre l'évolution de la perte de masse des trois BHP étudiés (BHP16, BHP17, BHP21) en fonction de la période d'immersion-séchage dans une solution d'acide chlorhydrique de 3 % de concentration.

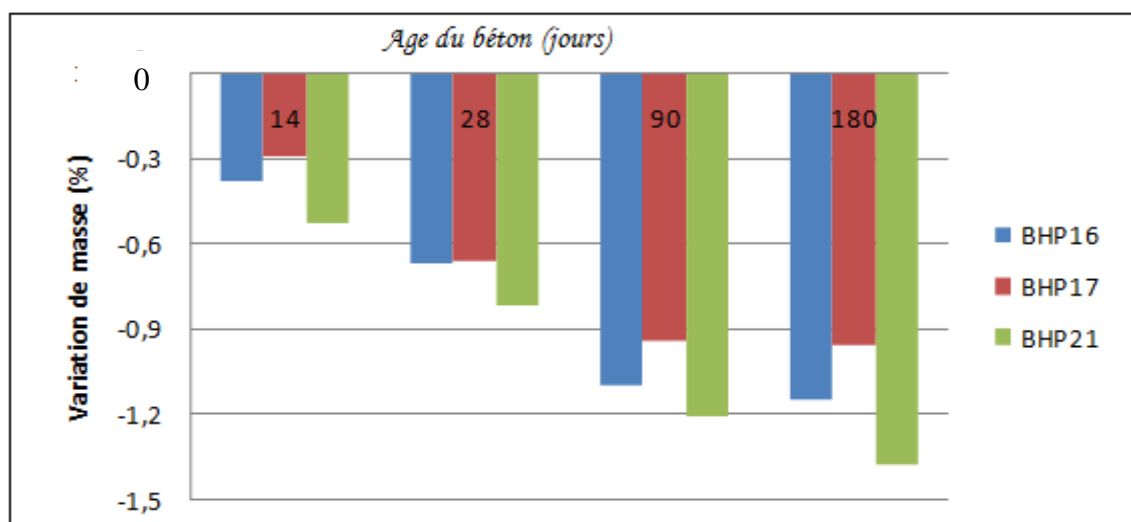


Figure IV.3. Variation de la perte en masse des bétons conservé dans la solution de HCl.

On constate une perte continue dans tous les BHP immergés dans la solution de l'acide chlorhydrique. Cette perte de masse s'explique par la forte solubilité de l'acide chlorhydrique dans l'eau qui réagit rapidement avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour donner le chlorure de calcium CaCl_2 qui détériore l'éprouvette provoquant ainsi une perte de masse.

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car les sels correspondants (Perchlorate, nitrate et chlorure de calcium) sont très facilement solubles dans l'eau [130].

Après 14 jours et jusqu'à l'âge de 180 jours, il est clair que les bétons BHP16 et BHP17 contenant de SDB et FC résistent mieux à l'attaque de l'acide chlorhydrique par rapport au BHP21 (béton de référence).

A l'âge de 14 jours, on note une perte de masse de l'ordre de 0,53% pour le BHP21 qui paraît le plus influencé par l'HCl ; pour le BHP16 (BHP avec ajout de FC), on note une perte de l'ordre de 0,38%, tandis que pour le BHP17 (BHP avec ajout de 5% de SDB et 5% de FC), qui paraît le plus résistant aux attaques acides, on enregistre une perte d'environ 0,29%.

A l'âge de 28 et 90 jours, la perte de masse augmente pour tous les BHP étudiés, mais avec des cinétiques différentes. A l'âge de 28 jours, les pertes de masse atteignent 0,82% pour le BHP21, 0,67% pour BHP16 et 0,66% pour BHP17. Cependant, à 90 jours, on peut constater que les BHP16 et BHP17 (contenant de SDB et FC) n'atteignent que 1,11% et 0,94% respectivement, comparés à celle du BHP21 qui atteint une perte de masse de l'ordre 1,21%.

Après 90 jours, on constate également une tendance à la stabilisation dans l'évolution de la perte en masse des bétons avec ajouts.

On peut conclure donc, que l'incorporation de SDB et de FC dans le BHP, réduit la perte de masse par rapport au BHP de contrôle lorsque le BHP est conservé dans une solution contenant 3 % d'HCl. Cependant, il faut noter que le béton BHP17 contenant 5% de SDB et 5% de FC développe la plus grande aptitude de résistance aux attaques acides (HCl).

IV.2.2. RÉSISTANCE MÉCANIQUE

IV.2.2.1. ACTION DE L'EAU SATURÉE EN CHAUX

Les figures IV.4 et IV.5 présentent les résultats de l'évolution des résistances à la compression et à la flexion des BHP en fonction de leur âge, durant les cycles « immersion-séchage » dans le cas de l'eau saturée en chaux.

□ *Evaluation de la résistance à la compression*

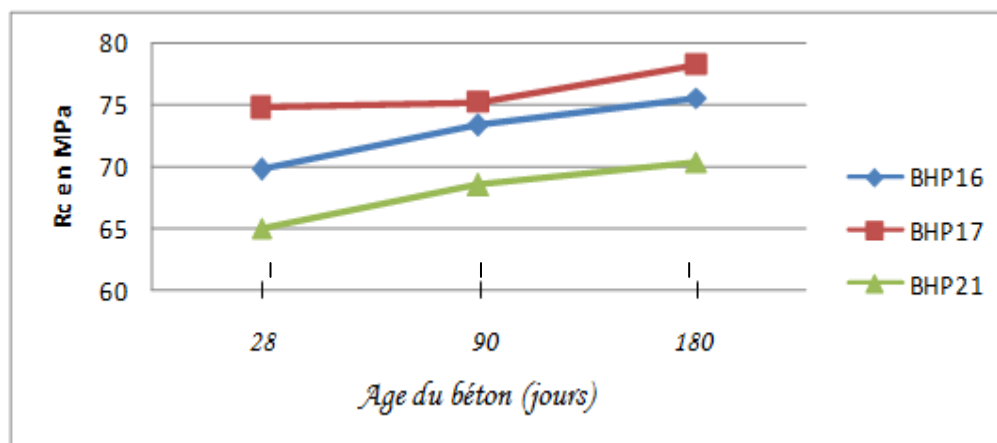


Figure IV.4. Evolution de la résistance à la compression des BHP pendant les cycles « immersion-séchage » dans la solution 10% de chaux.

La figure IV.4 montre l'augmentation de la résistance à la compression, en fonction de la durée de conservation dans l'eau saturée en chaux qui est notablement plus rapide pour les BHP avec ajouts que celle du BHP de référence. Les résistances atteintes pour les BHP avec ajouts sont comprises entre 66 et 79 MPa.

On peut constater que la substitution d'une partie du ciment par le SDB et le FC conduit à une accélération de l'augmentation des résistances à long terme, du moment que la résistance à la compression des BHP16 et BHP17 dépasse celle donnée par le BHP21 aux différents âges. La substitution du ciment par le SDB traduit ainsi l'amélioration de la compacité par double effet : effet-filler et effet pouzzolanique [131,132]. L'effet-filler conduit à l'amélioration des propriétés mécaniques par une densification de la matrice cimentaire et l'effet-pouzzolanique améliore les performances mécaniques à long terme en consommant la chaux. Les produits d'hydratation et de la réaction pouzzolanique ainsi obtenus remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains).

La chaux du ciment et celle du milieu de conservation sont consommées par la réaction pouzzolanique du SDB. Cette réaction produit des gels C-S-H supplémentaires qui contribuent à l'amélioration de la résistance du BHP17 à moyen et surtout à long terme.

□ *Evaluation de la résistance à la flexion*

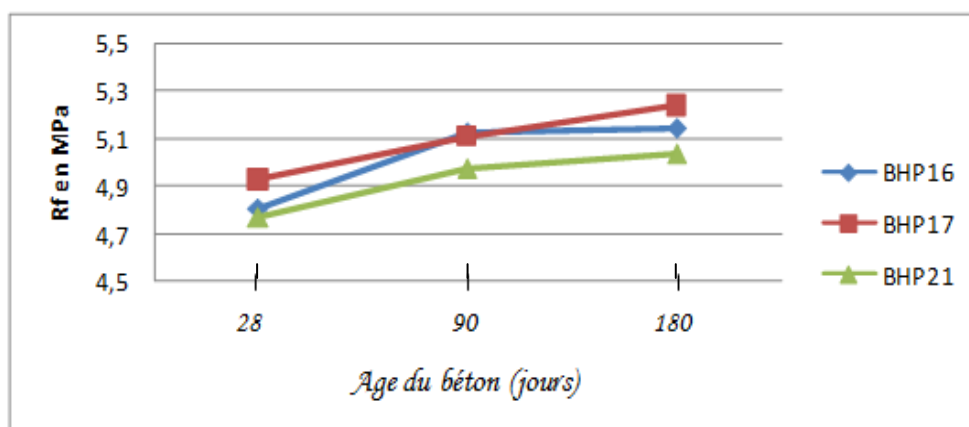


Figure IV.5. Évolution de la résistance à la flexion durant la période d'immersion-séchage en solution de 10% de chaux.

Le développement des résistances en flexion est encore plus rapide que celui des résistances en compression. La densification de la matrice et l'évolution de l'interface pâte-granulat sont à l'origine de l'amélioration de la résistance en flexion.

A l'âge de 180 jours, la résistance à la flexion atteint 5,04 MPa pour le BHP21, 5,15 MPa pour le BHP16 (avec 10% de FC), 5,24 MPa pour le BHP17 (avec 5% de SDB et 5% de FC). La résistance en flexion la plus élevée est celle de béton avec ajout de 5% de SDB et de 5% de FC (BHP17). Ceci est attribué à la réaction pouzzolanique du SDB, qui est due à la consommation de la portlandite (CH) produite suite à l'hydratation du ciment.

IV.2.2.2. ACTION DE SULFATE DE MAGNÉSIUM « MgSO₄ »

□ *Evaluation de la résistance à la compression*

La figure IV.6 met bien en évidence l'effet de l'ajout des additions (SDB et FC) sur la résistance à la compression des BHP soumis à des cycles d'immersion-séchage dans la solution de 10% MgSO₄.

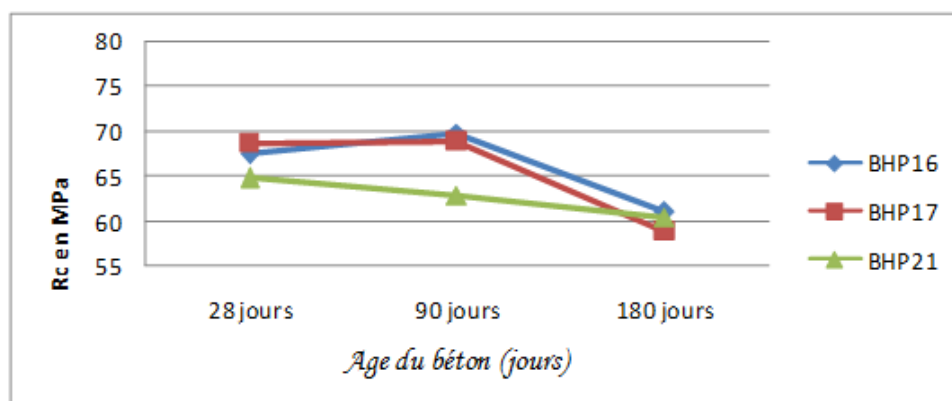


Figure IV.6. Evolution de la résistance à la compression des BHP conservés durant la période des cycles d'immersion-séchage dans la solution de MgSO₄.

On constate que la résistance à la compression du BHP21 (BHP témoin) a chuté dès le 28^{ème} jour de conservation en solution de 10 % de sulfate de magnésium. La diminution de la résistance est de l'ordre de 2 MPa à l'âge de 90 jours. Par contre, l'effet de l'attaque de sulfate de magnésium est constaté après 90 jours d'immersion-séchage dans le cas des BHP16 et le BHP17.

Cette chute de résistance à la compression est estimée à l'âge de 180 jours à 4,38 MPa pour le BHP21 (témoin), 8,77 MPa pour le BHP16 (10% de FC), 10 MPa pour le BHP17 (5% de SDB et 5% de FC). La résistance en compression la plus élevée à l'âge de 180 jours est celle du BHP16 (béton avec ajout de 5% de FC), suivie par le BHP21 (témoin) qui est supérieure à celle du BHP17 (à base de 5% de SDB et de 5% de FC). La chute de la résistance à la compression dans le cas du BHP17 est due à la lixiviation de la portlandite qui est le minéral le plus vulnérable à l'agression chimique. La présence de la portlandite serait bénéfique, du moment où elle diminue l'action du sulfate de magnésium en permettant sa rétention dans la brucite ; donc la quantité résiduelle du magnésium, apte à l'attaque des C-S-H, serait inversement proportionnelle à la quantité de portlandite dans la pâte de ciment [133-135]. Ce qui permet de conclure que le SDB a un effet néfaste face aux attaques de sulfates de magnésium.

La résistance en compression la plus élevée de BHP16 confectionné avec le 'FC' seul est expliquée par l'attaque des sulfates de magnésium qui est retardée à cause de la réaction entre la matrice cimentaire et le calcaire pour produire des C-S-H supplémentaires [126,136].

Plusieurs recherches [137,138], indiquent que l'augmentation de la résistance à la compression avant sa chute à un certain âge est due à la formation de l'ettringite et du gypse qui remplissent les micropores menant à une structure plus dense, mais au-delà d'un certain âge, la formation de ces produits expansifs cause la destruction de la pâte de ciment durcie et sa fissuration, ce qui influe négativement sur les caractéristiques mécaniques des bétons.

L'agression chimique due aux solutions de sulfate de magnésium, après leur pénétration dans la matrice cimentaire, se caractérise par leur réaction avec les hydrates et le changement de leur structure.

Les sulfates de magnésium ont un mode d'action particulier, encore plus préjudiciable au béton car, en plus de la formation d'ettringite secondaire, selon les réactions (IV.2) et (IV.3), se produit la substitution des ions calcium Ca^{2+} par les ions magnésium Mg^{2+} au niveau des silicates de calcium hydratés C-S-H, selon la réaction (IV.3). Ceci entraîne la perte de leurs propriétés liantes et donc la perte de la résistance mécanique du béton, car les silicates de magnésium hydratés M-S-H n'ont pas de caractères liants. Cependant l'hydroxyde de magnésium $\text{Mg}(\text{OH})_2$ sous forme de brucite, produit de la réaction (IV.1), peut ralentir la pénétration des sulfates et former une couche protectrice, si celle-ci n'est pas détruite mécaniquement. C'est ce qui peut expliquer le bon comportement de certains bétons dans l'eau de mer, pourtant riche en ions sulfate et magnésium [139].

Les réactions chimiques des sulfates avec la pâte de ciment donnent naissance à des produits fortement expansifs, l'attaque de l'aluminate de calcium forme le sulfoaluminate de calcium ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) connu sous le nom d'ettringite secondaire et l'attaque de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui forme le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Des recherches récentes [140,141] ont montré une nouvelle forme d'attaque due à la formation de la thaumasite ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$). La formation de ce produit expansif est favorable à des températures de 5° C et en présence du calcaire.

Le gypse et l'ettringite secondaire, éventuellement de la thaumasite, formés occupent un volume plus grand que celui des composants solides à partir desquels ils se forment, leur formation causant ainsi le gonflement et la fissuration de la pâte. Les pressions exercées lors de la formation des produits expansifs influent sur les caractéristiques mécaniques des bétons lorsqu'ils sont dans un environnement où il existe une source de sulfate.

A partir de ces résultats, on constate bien l'effet bénéfique de l'ajout de SDB et de FC sur la résistance à l'agressivité des BHP soumis à des cycles d'immersion-séchage dans une solution de 10 % de sulfate de magnésium.

□ **Evaluation de la résistance à la flexion**

La figure IV.7 présente les valeurs des résistances à la flexion obtenue pour les différents BHP attaqués par le sulfate de magnésium :

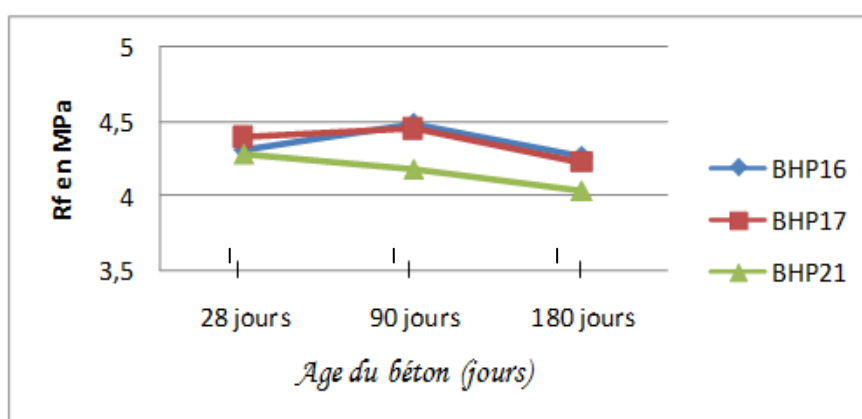


Figure IV.7. Evolution de la résistance à la flexion des bétons conservés dans la solution de MgSO₄.

Si l'on observe l'allure de la courbe des résistances des BHP conservés dans la solution de 10% de MgSO₄ (figure IV.7), on remarque que le BHP21 est le premier à subir une chute de résistance à la flexion, cette chute est accentuée à 180 jours. La chute de résistance est attribuée à la réaction entre la Portlandite (CH) issue de l'hydratation du ciment avec les sulfates de magnésium qui mènent à la formation des quantités considérables du gypse [80,142] et de l'ettringite expansive causant des microfissures qui engendrent la réduction de la résistance à la flexion [143].

Les BHP avec ajouts (BHP16, BHP17) ont une conservation de la résistance dans l'environnement sulfatique. La chute de la résistance à la flexion des BHP à base de SDB et de FC est retardée jusqu'à 90 jours d'immersion-séchage et atteint des valeurs à 180 jours supérieures à celle du BHP21 témoin.

On note des chutes de résistance à la flexion après 180 jours d'immersion-séchage en solution de MgSO₄ qui sont de l'ordre de 3,35% pour le BHP21, 4,7% pour le BHP16 et 5% pour le BHP17.

Le BHP16 conservé dans la solution de 10% de MgSO₄ présente une légère augmentation de la résistance à la flexion par rapport à celle du BHP17. Ceci est dû à la portlandite consommée par la réaction pouzzolanique du SDB qui a probablement un effet bénéfique dans les attaques de sulfate de magnésium.

IV.2.2.3. ACTION DE L'ACIDE CHLORHYDRIQUE

□ *Evaluation de la résistance à la compression*

Les résultats de la variation de la résistance en compression des BHP testés dans 3% de HCl en fonction du temps sont représentés sur la figure IV.8.

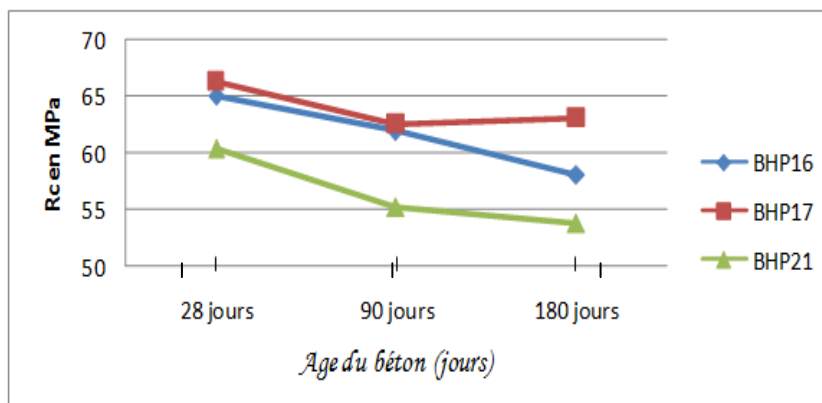


Figure IV.8. Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction des cycles immersion-séchage dans 3% de HCl.

Pour toutes les échéances, le BHP de référence paraît moins résistant que celui avec ajouts ; cet effet bénéfique s'explique par le déclenchement de la réaction pouzzolanique du SDB, l'effet de remplissage du calcaire et de densification de la matrice cimentaire par les ajouts qui a également apporté une résistance importante aux milieux agressifs des BHP avec ajouts.

En outre, le déclenchement de la réaction pouzzolanique du SDB lui permet de consommer la portlandite issue de la réaction d'hydratation du ciment. Ce qui donne naissance à de nouveaux C-S-H qui font densifier davantage la matrice cimentaire et occupent les pores libres, cela rend la structure plus compacte et par conséquent plus résistante. Donc une compacité élevée est assurée, ce qui limite au minimum la diffusion de l'agent agressif HCl à l'intérieur de la matrice ; ceci amortit énormément l'influence du milieu acide sur la qualité des BHP.

Le BHP17 présente une résistance élevée par rapport au BHP16, cela peut être dû à l'utilisation de 10% de FC dans le BHP16 qui paraît un peu exagérée. Les carbonates sont facilement solubles dans un acide fort tel que l'acide chlorhydrique, ces carbonates émettent du CO₂ gazeux et le béton devient alors, poreux.

On note aussi que le BHP17 présente une résistance presque stable de 90 à 180 jours. Ce qui explique que la résistance du BHP17 confectionné avec 5% de SDB et 5% de FC à l'attaque par les acides chlorhydriques n'est pas fortement affectée.

La chute de la résistance mécanique à la compression due à l'attaque par l'acide chlorhydrique pour le BHP21 est plus importante que celle des BHP à base de SDB et de FC. Cela est dû à l'attaque de la pâte de ciment par l'acide qui conduit à la formation des chlorures de calcium qui sont solubles dans l'eau [113], ce qui développera ainsi une porosité importante menant à une perméabilité qui diminuera la durabilité des matériaux et par conséquent la résistance mécanique [144,145].

□ **Evaluation de la résistance à la flexion**

En considérant la résistance à la flexion des BHP, la figure IV.9 présente les résultats d'évolution des résistances à la flexion des BHP conservés dans l'acide chlorhydrique en fonction de leurs âges :

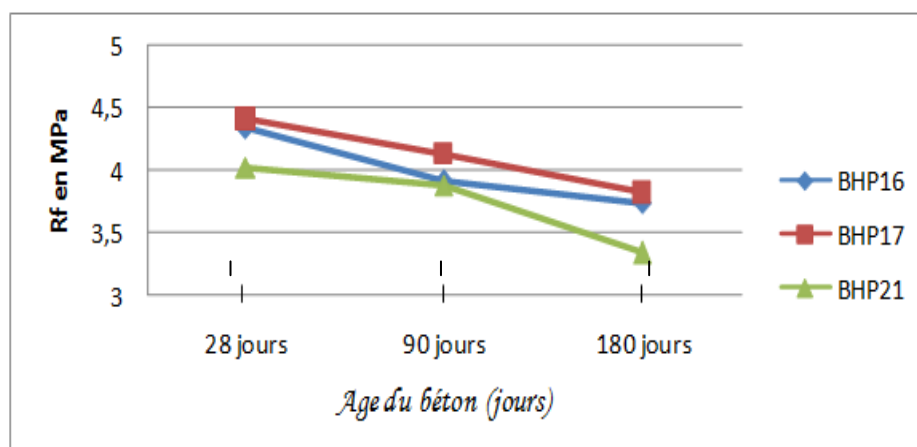


Figure IV.9. Evolution de la résistance à la flexion des BHP en fonction de la période d'immersion-séchage dans 3% de HCl.

D'après la figure IV.9, nous remarquons que tous les BHP enregistrent une chute de résistance à la flexion dès l'âge de 28 jours d'immersion-séchage dans 3% de HCl. A l'âge de 28 jours, les BHP confectionnés avec le SDB et le FC atteignent une résistance à la flexion de l'ordre de 4,34 MPa et de 4,41 MPa respectivement. Ces dernières commencent à diminuer dès le 28^{ème} jour.

L'augmentation de la résistance à la flexion du BHP17 est principalement due à la réduction de la portlandite (CH), dans ces bétons contenant du SDB, qui rentre dans la réaction pouzzolanique. Cette réaction produit des C-S-H secondaires qui diminuent la porosité capillaire de BHP17 causant par la suite une réduction du transport et de diffusion de l'acide HCl dans le béton.

En conclusion, le sable de dune finement broyé et les fillers calcaires offrent en fait une bonne protection contre l'agressivité de l'acide chlorhydrique.

IV.2.3. VARIATION DE LONGUEUR

Le changement de la longueur des éprouvettes des différents BHP soumis à des cycles immersion-séchage dans les trois milieux de conservation, représenté par la figure IV.10, met bien en évidence l'existence : d'un retrait pour les BHP conservés dans le milieu acide (3% de HCl), et d'une expansion pour les BHP conservés dans la solution de 10% de MgSO₄.

Concernant les BHP conservés dans l'eau saturée en chaux tout au long des cycles immersion-séchage, le changement de la longueur en fonction du temps ne permet pas d'affirmer que les échantillons exposés à ces cycles n'ont pas subi une expansion élevée, au moins jusqu'au terme des essais, c'est-à-dire 6 mois.

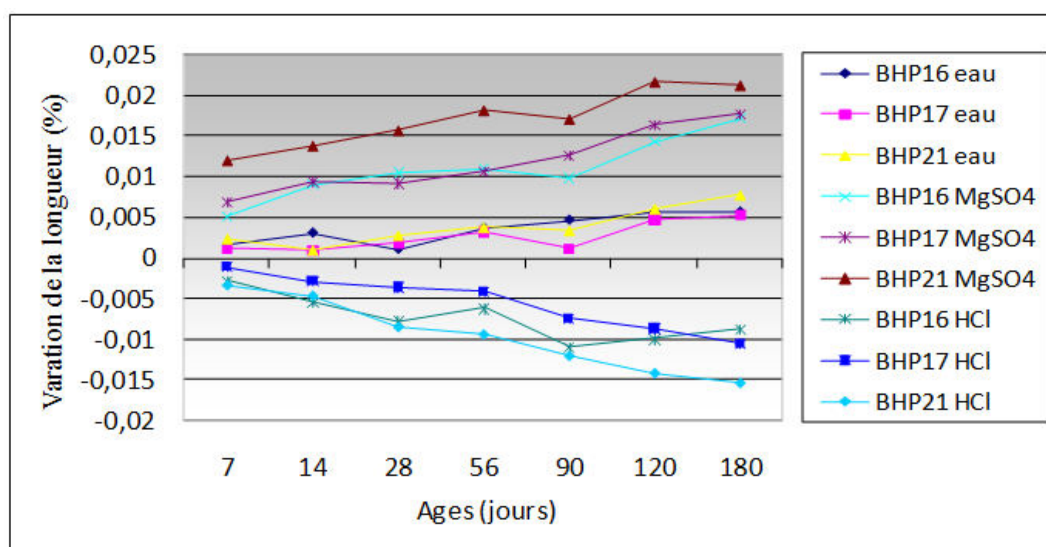


Figure IV.10. Evolution des changements de longueur des BHP conservés dans les différents milieux de conservation.

Le suivi de la variation dimensionnelle des BHP étudiés est effectué à la fin de chaque cycle de vieillissement pour les trois milieux de conservation. Ce suivi montre que le retrait évolue lentement pour toutes les éprouvettes des BHP soumis à des cycles d'immersion-séchage dans la solution de HCl.

Les BHP avec ajouts de SDB et de FC se comportent mieux et présentent un retrait moins important que le BHP témoin (sans ajouts) et diffèrent l'un de l'autre jusqu'à une durée d'immersion-séchage de 180 jours.

Le BHP17 présente un pourcentage de retrait de l'ordre de $1,1 \times 10^{-3} \%$ à 7 jours et qui ne dépasse pas $1,05 \times 10^{-3} \%$ à 180 jours, tandis que le BHP16 présente un retrait de l'ordre de $2,8 \times 10^{-3} \%$ à 7 jours et de l'ordre de $8,8 \times 10^{-3} \%$ à 180 jours. Par contre le BHP témoin présente un retrait de l'ordre de $3,4 \times 10^{-3} \%$ à 7 jours et dépasse les $15 \times 10^{-3} \%$ à 180 jours.

Le faible retrait des BHP16 et BHP17 peut être expliqué par la réduction de la portlandite suite à sa consommation par la réaction pouzzolanique et la formation de gels secondaires de C-S-H, rendant la microstructure compacte et moins poreuse. Il est dû aussi à la grande finesse des ajouts, qui avantage la densification dès les premières échéances.

Les résultats indiquent une expansion dans les BHP conservés dans la solution de $MgSO_4$ en procédant par cycles accélérés. Cette expansion accroît régulièrement en fonction de la durée d'immersion-séchage. Ceci se traduit par l'apparition de phases minéralogiques expansives dans le matériau durci (gypse et ettringite secondaire) susceptibles de faire gonfler la pâte de ciment.

Les BHP avec ajouts présentent aussi de faibles expansions par rapport au BHP témoin (sans ajout de SDB et FC). On enregistre un pourcentage d'expansion assez important de l'ordre de $21,3 \times 10^{-3} \%$ à 180 jours pour le béton témoin comparé à ceux des bétons avec ajouts de SDB et de FC (BHP16 et le BHP17) qui sont très voisines et de l'ordre de $17,1 \times 10^{-3} \%$ et $17,7 \times 10^{-3} \%$ à 180 jours.

L'expansion mineure du BHP17 et du BHP16 peut être attribuée à la consommation de la portlandite, qui réduit le potentiel de formation du gypse et de l'ettringite secondaire. En outre, la réaction pouzzolanique engendre la formation de gels secondaires de C-S-H qui

forment une enveloppe sur les aluminates et d'autres phases réactives, ce fait gêne la formation de l'ettringite [146].

En revanche, le suivi de la variation de la longueur des éprouvettes des BHP étudiés dans le milieu de l'eau saturée en chaux présente un risque faible d'expansion par rapport à celui trouvé dans les BHP conservés dans la solution de $MgSO_4$. Cette faible expansion est due à la chaux du milieu de conservation qui est un acteur important dans la réaction pouzzolanique du SDB. En effet, elle est considérée comme un réservoir à ions hydroxyles et un réservoir à ions calcium favorisant la formation de produits tels que les C-S-H [147].

En conclusion, la présence du SDB et du FC dans la formulation du BHP a rendu la microstructure plus dense, a réduit le retrait et a abaissé l'expansion des BHP causée par l'attaque sulfatique.

La contribution de l'ajout de SDB se manifeste par la formation d'un béton durci plus compacte, à cause des gels de C-S-H appelés gels de deuxième génération, issus de la réaction entre la silice et la chaux de l'ajout de SDB et du FC et les produits d'hydratation du ciment.

IV.2.4. COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTES ATTAQUES

Les figures IV.11 et IV.12 présentent les différents résultats des résistances à la compression et à la flexion des BHP, après 180 jours d'immersion-séchage dans les trois milieux de conservation :

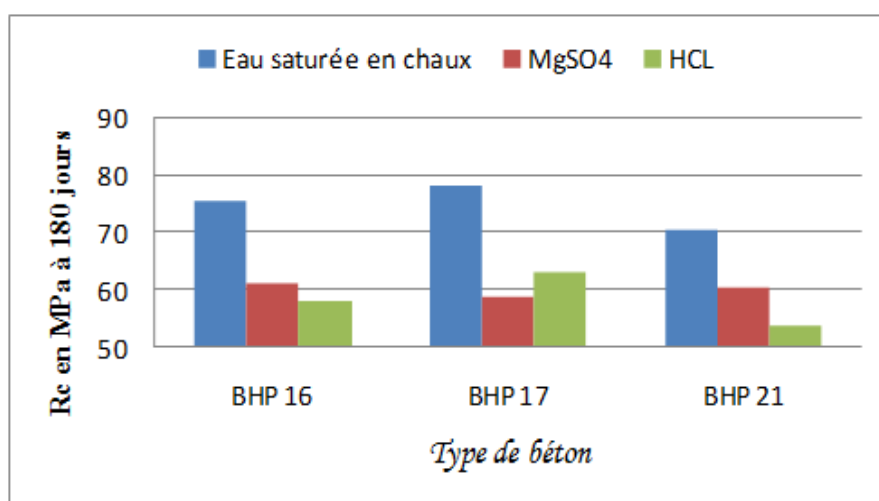


Figure IV.11. Résistances à la compression des BHP à 180 jours.

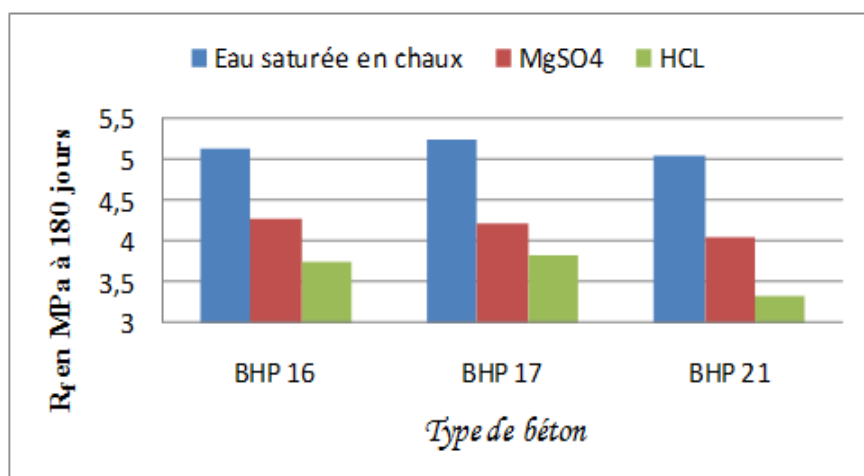


Figure IV.12. Résistances à la flexion BHP à 180 jours.

Pour tous les BHP conservés dans la solution de $MgSO_4$ et la solution HCl, les résistances à la compression et à la flexion sont inférieures à celles enregistrées pour les spécimens conservés dans l'eau saturée en chaux.

La diminution de la résistance à la compression et à la flexion de l'ensemble des bétons attaqués par le sulfate de magnésium et l'acide chlorhydrique par rapport au milieu de référence (eau saturée en chaux) peut être expliquée, d'un côté par la formation de la brucite ($Mg(OH)_2$) en plus du gypse et l'ettringite secondaires et la substitution ionique des ions Ca^{2+} par les ions Mg^{2+} dans les C-S-H (Ces M-S-H sont des gels faiblement cohésifs ce qui affecte considérablement les propriétés liantes et par conséquent les propriétés mécaniques des pâtes de ciment durcies), et d'autre coté par la forte solubilité de l'acide chlorhydrique dans l'eau qui réagit rapidement avec l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ pour donner le chlorure de calcium $CaCl_2$ qui détériore l'éprouvette provoquant une diminution de la résistance mécanique.

L'augmentation de la résistance mécanique des BHP suite à l'immersion-séchage dans l'eau saturée en chaux peut être attribuée à deux types de réactions, une hydratation continue des composants du ciment non hydraté pour former davantage des produits d'hydratation, en plus, la réaction pouzzolanique du SDB avec la chaux libérée et la chaux du milieu pour former des C-S-H supplémentaires.

Les résultats de la résistance mécanique montrent aussi que les BHP sont affectés par la nature de l'agent agressif auquel sont soumis ; En ordre d'agressivité décroissant, on peut dire que : l'acide chlorhydrique HCl est le plus agressif en comparaison avec le sulfate de magnésium $MgSO_4$.

Il faut noter enfin que, bien que les résistances à la compression soient plus ou moins affectées par les milieux agressifs, ces résistances restent toujours supérieures à 50 MPa quel que soit le milieu de conservation. Les taux de chute de la résistance à la compression des BHP suite à l'immersion-séchage dans la solution de 10 % de $MgSO_4$ et la solution de 3 % de HCl après une durée de 180 jours, sont respectivement de 9,56 % et 10,7 % pour le BHP16 et 14,5 % et 4,8 % pour le BHP17.

IV.2.5. L'EXAMEN VISUEL

L'analyse visuelle a été effectuée pour bien apprécier les signes évidents de la détérioration extérieure des spécimens de béton tels que l'altération, la fissuration et le ramollissement suite à leurs conservations dans différents milieux.

Les photos des figures IV.13 et IV.14 montrent, qu'après 180 jours d'immersion-séchage dans les différentes solutions, les éprouvettes de BHP17 et de BHP16 ne sont pas affectées de façons très sensibles.



Figure IV.13 : Etat de surface des éprouvettes de BHP17 après 180 jours d'immersion-séchage dans les différents milieux
(a) HCl, (b) $MgSO_4$, (c) Eau saturée en chaux

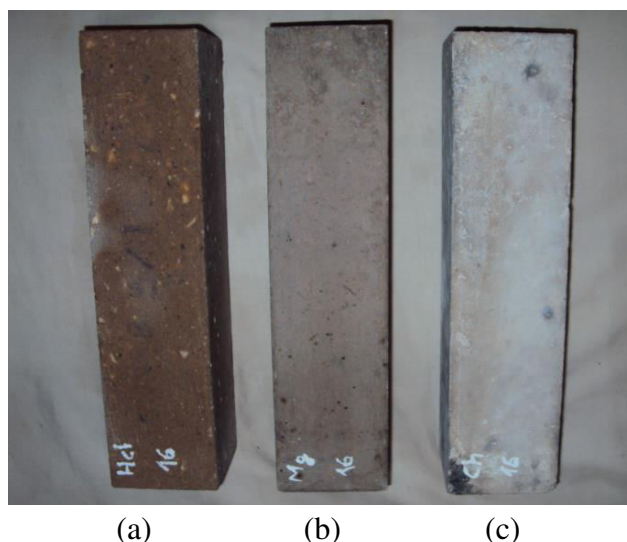


Figure IV.14 : Etat de surface des éprouvettes de BHP16 après 180 jours d'immersion-séchage dans les différents milieux.
(a) HCl, (b) $MgSO_4$, (c) Eau saturée en chaux

Il est bien clair que l'examen visuel ne révèle aucun signe de dégradation, donc aucune fissuration au niveau macroscopique n'a été observée sur les éprouvettes contenant de SDB et de FC (BHP17, BHP16). Ceci confirme la bonne tenue de ces derniers dans les milieux

agressifs. Par ailleurs, la figure IV.15, montre quelques signes de détérioration extérieure des éprouvettes de BHP21 exposées à l'attaque sulfatique de $MgSO_4$ et à l'attaque acide de HCl. Les signes de l'attaque des sulfates et des acides les plus nettes se manifestent sous forme de microfissures autour des coins et aux niveaux des arêtes des éprouvettes de BHP21.

L'inspection visuelle des spécimens des BHP dans la solution $MgSO_4$, nous montre la formation d'une couche blanchâtre sur la surface extérieure des échantillons. Ainsi, l'attaque acide de HCl conduit à une érosion superficielle décelée par le dépôt de sédiments au fond des bacs de conservation, provenant de la surface érodée des bétons.

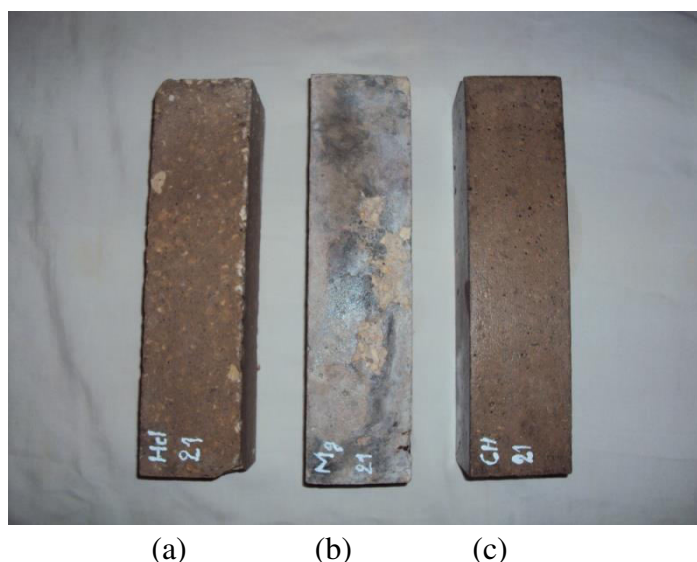


Figure IV.15 : Etat de surface des éprouvettes de BHP21 après 180 jours d'immersion-séchage dans les différents milieux.
(a) HCl, (b) $MgSO_4$, (c) Eau saturée en chaux

IV.2.6. ANALYSE PAR DRX

L'appareil utilisé dans cet essai est un «diffractomètre X' PERT PRO». Les analyses par diffraction X des surfaces des BHP soumises aux attaques acides et sulfatiques ont permis d'identifier et de positionner les différentes phases cristallines rencontrées à la surface du matériau altéré. La couche des minéraux formés à la surface de l'échantillon est analysée, après avoir subi un grattage sur une épaisseur d'un millimètre et un broyage pour obtenir une poudre fine.

IV.2.6.1. CARACTÉRISATION PAR DIFFRACTION X DES BHP CONSERVÉS DANS L'EAU SATURÉE EN CHAUX

La figure IV.16 présente les diffractogrammes des RX réalisés sur les différents BHP analysés à savoir le BHP16, le BHP17 et le BHP21 conservés dans l'eau saturée en chaux.

Les diffractogrammes montrent l'existence de grands pics de carbonate de calcium et de quartz pour tous les échantillons de BHP. Les intensités des pics de quartz les plus élevées concernent surtout les bétons BHP16 et BHP21 dont les valeurs se rapprochent les unes des autres, elles sont de l'ordre de 910 et 900 successivement, tandis que, celui du BHP17 est la moins importante, elle est de l'ordre de 780.

Les pics majeurs de quartz 26.68° , 39.52° et 45.89° peuvent être expliqués par le fait que les BHP sont confectionnés par du sable alluvionnaire de nature silico-calcaire et du sable dunaire broyé siliceux.

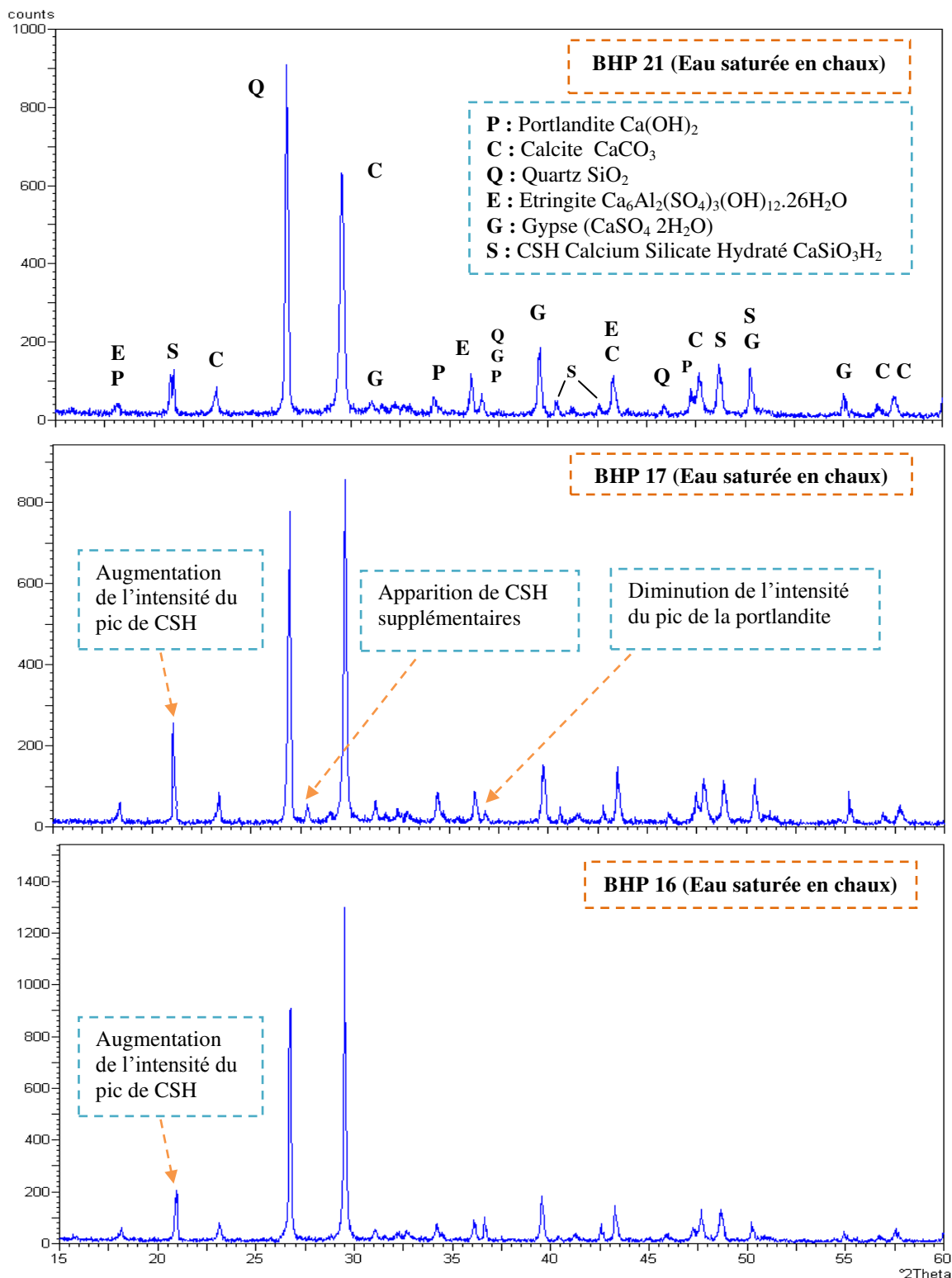


Figure IV.16 : Diffractogrammes DRX des BHP conservés dans l'eau saturée en chaux après 180 jours.

Les pics majeurs de carbonate de calcium sont bien visualisés dans tous les spécimens, étant donné qu'ils sont confectionnés par des granulats de nature calcaire et des fillers calcaires qui font augmenter le taux de la calcite dans les liants.

L'intensité du pic de carbonate de calcium la plus élevée concerne surtout le BHP16 dont la valeur est de 1300, tandis que celle du BHP17 présente une intensité de l'ordre de 860, alors que celle du BHP21 est la moins importante elle est d'environ 630.

Dans la figure IV.16, sur le spectre de BHP21 on aperçoit clairement les pics de la portlandite Ca(OH)_2 ; leurs intensités élevées témoignent de sa forte présence. Ces pics se trouvent dans les positions : 18.1° ; $34,16^\circ$; 36.68° et $47,24^\circ$, tandis que, sur le spectre de BHP17 et de BHP16, les pics de la portlandite sont caractérisés par une faible intensité, notamment ceux situés dans positions 36.68° et $34,16^\circ$ respectivement.

La faible teneur en portlandite dans le BHP17 est attribuée à la consommation de ce minérale par la réaction pouzzolanique du SDB d'où la diminution de son pic majeur à $36,68^\circ$.

Cette faible intensité dans le cas du BHP16 est expliquée par la présence du calcaire qui conduit à la formation du carboaluminate. Cette réaction pourrait causer la diminution de la portlandite [148].

Les spectres du DRX de la même figure montrent la présence de l'ettringite et du gypse secondaires, qui se trouvent dans les positions 36.11° et 46° . La formation du gypse est observée dans les positions 31.07° ; 39.61° et 50.37° .

Ainsi, le résultat de l'analyse du DRX des BHP avec ajouts après 180 jours d'immersion-séchage dans l'eau saturée en chaux, confirme la formation de silicate de calcium hydraté « C-S-H » en proportions plus élevées que celles du béton témoin BHP21, où l'on note quelques pics de faibles intensités.

Le taux élevé des C-S-H dans le BHP17 est dû à la présence du SiO_2 en quantités plus ou moins élevées dans les liants de ces bétons. La silice du SDB réagit avec la chaux du ciment, formant un composé de silicate de calcium hydraté secondaire. La chaux du milieu de conservation est aussi responsable de la production des gels de C-S-H supplémentaires par la réaction pouzzolanique du SDB. Il apparaît aussi que le BHP16 avec addition de calcaire contient plus de C-S-H que le béton témoin BHP21, cela est dû au fait que le calcaire réagit avec le C_3A pour former des carbonates d'aluminate de calcium (carboaluminates), en particulier dans les ciments riches en C_3A . Il y a une interaction entre le silicate de calcium (silicate tricalcique) et le carbonate de calcium, ce dernier accélère l'hydratation du C_3S et modifie le rapport Ca/Si des C-S-H. Le CaCO_3 accélère également l'hydratation du C_3A . L'hydratation du C_3A a été contrôlée lorsque le CaCO_3 et les $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ coexistaient en proportions appropriées dans le ciment [148].

IV.2.6.2. CARACTÉRISATION PAR DIFFRACTION AUX RAYONS X DE L'ATTAQUE SULFATIQUE

Les résultats de l'analyse du DRX des BHP étudiés après l'attaque par une solution de 10% de sulfate de magnésium, montrés par la figure IV.17 confirment une présence de produits expansifs tels que l'ettringite secondaire et le gypse secondaire.

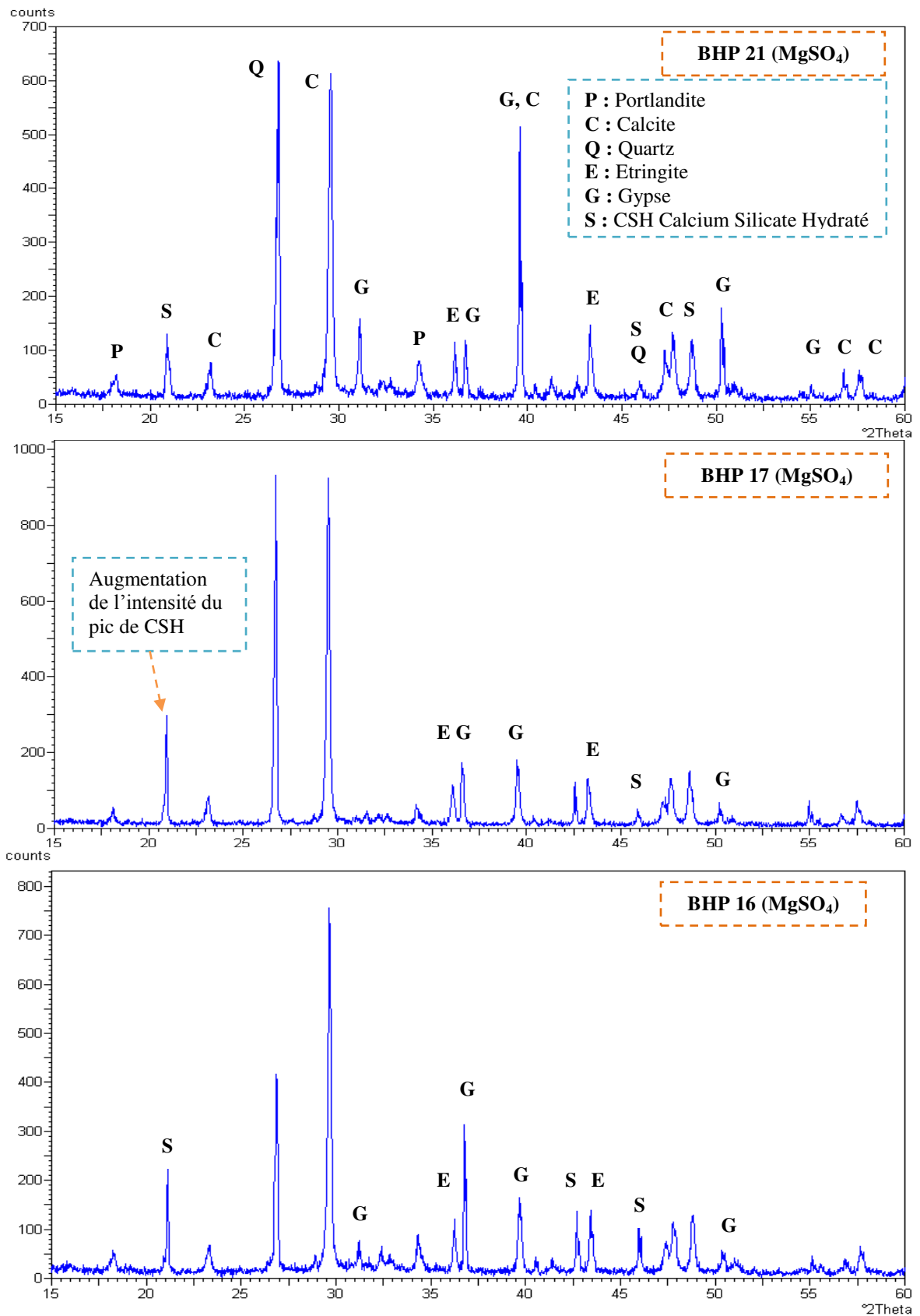


Figure IV.17 : Diffractogrammes des R-X des BHP conservés après 180 jours d'immersion-séchage dans la solution de 10% de $MgSO_4$.

En comparant les trois diffractogrammes, on constate que les pics caractérisant le gypse G et l'ettringite E dans le béton témoin BHP21 sont plus visibles et plus intenses que ceux du BHP17 et du BHP16. Ceci est attribué à la teneur élevée en portlandite dans le BHP21, qui est responsable de la formation du gypse et de l'ettringite suite à sa réaction avec les sulfates. Par contre dans le BHP17, le taux de la portlandite est plus faible du fait de sa consommation par le SDB lors de la réaction pouzzolanique. La raie de la portlandite est beaucoup moins importante ($34,68^\circ$, $47,24^\circ$).

Une quantité plus basse de gypse trouvée dans le BHP17 et le BHP16 à $48,77^\circ$ peut être expliquée par la réaction d'une certaine quantité d'aluminates tricalcique et de CaCO_3 avec des ions de SO_4 .

La portlandite se trouve en quantité infime dans la partie superficielle du BHP21 et en quantité moindre dans les échantillons BHP16 et BHP17. Dans le BHP17, la quantité de la portlandite est inférieure à celle du BHP16. Cette décroissance en pourcentage de la portlandite est due, d'une part, à la réaction pouzzolanique où l'on note la consommation de la portlandite (C-H), libérée au cours de l'hydratation du ciment, par le SDB, et d'autre part à la dissolution de la portlandite, composé vulnérable vis-à-vis des solutions de sulfates. Il en résulte une réduction de la teneur en portlandite et la production d'une plus grande quantité de C-S-H [148].

La portlandite réagit avec le MgSO_4 pour donner du gypse et de la brucite; le gypse réagit avec le C_3A ou les aluminates hydratés pour former de l'ettringite secondaire. Les C-S-H sont progressivement dégradés par formation d'un silicate hydraté calco-magnésien de type (C,M)-S-H dans lequel le calcium est remplacé plus ou moins complètement par le magnésium. Le produit final peut être un mélange de brucite et d'un gel de silice. La formation de ces phases consomme des ions OH^- et conduit à la diminution du pH de la solution interstitielle provoquant la dissolution de la plupart des hydrates de la matrice cimentaire [148].

Selon Lee et coll. [133,134] et Ganjian et coll. [135], le calcium libéré réagit avec les sulfates pour former du gypse. D'après ces auteurs, la présence de la portlandite serait bénéfique car elle retarderait l'action des ions magnésium dont elle permettrait le piégeage sous forme de brucite. La quantité résiduelle de magnésium susceptible d'attaquer les C-S-H serait inversement proportionnelle à la quantité de portlandite initialement présente dans la matrice cimentaire. Cela expliquerait pourquoi des bétons à base d'additions pouzzolaniques, telles que le métakaolin ou la fumée de silice, peuvent s'avérer moins résistants que des bétons sans pouzzolanes, lorsqu'ils sont immergés dans une solution de sulfate de magnésium.

IV.2.6.3. CARACTÉRISATION PAR DIFFRACTION AUX RAYONS X DE L'ATTAQUE ACIDES

La figure IV.18 montre les diffractogrammes des RX des BHP étudiés après 180 jours d'immersion-séchage dans la solution de 3% d'acide chlorhydrique.

Le résultat des trois diffractogrammes montre l'effet de l'attaque par l'acide chlorhydrique qui modifie la composition minéralogique des BHP, par la diminution de l'intensité de certains minéraux et l'augmentation de l'intensité d'autres, en d'autre terme, l'apparition de nouvelles phases cristallines hydratées. Ces spectres sont identiques aux spectres de la figure IV.17, avec quelques changements du point de vue intensité des raies des phases hydratées. Il est à noter l'apparition des sels de chlorure de calcium hydraté $\text{CaCl}_2(\text{H}_2\text{O})_4$.

Par exemple aux positions 15.71° , 31.73° , 41.44° et 50.76° , on constate la formation des sels de chlorure de calcium hydraté $\text{CaCl}_2(\text{H}_2\text{O})_4$.

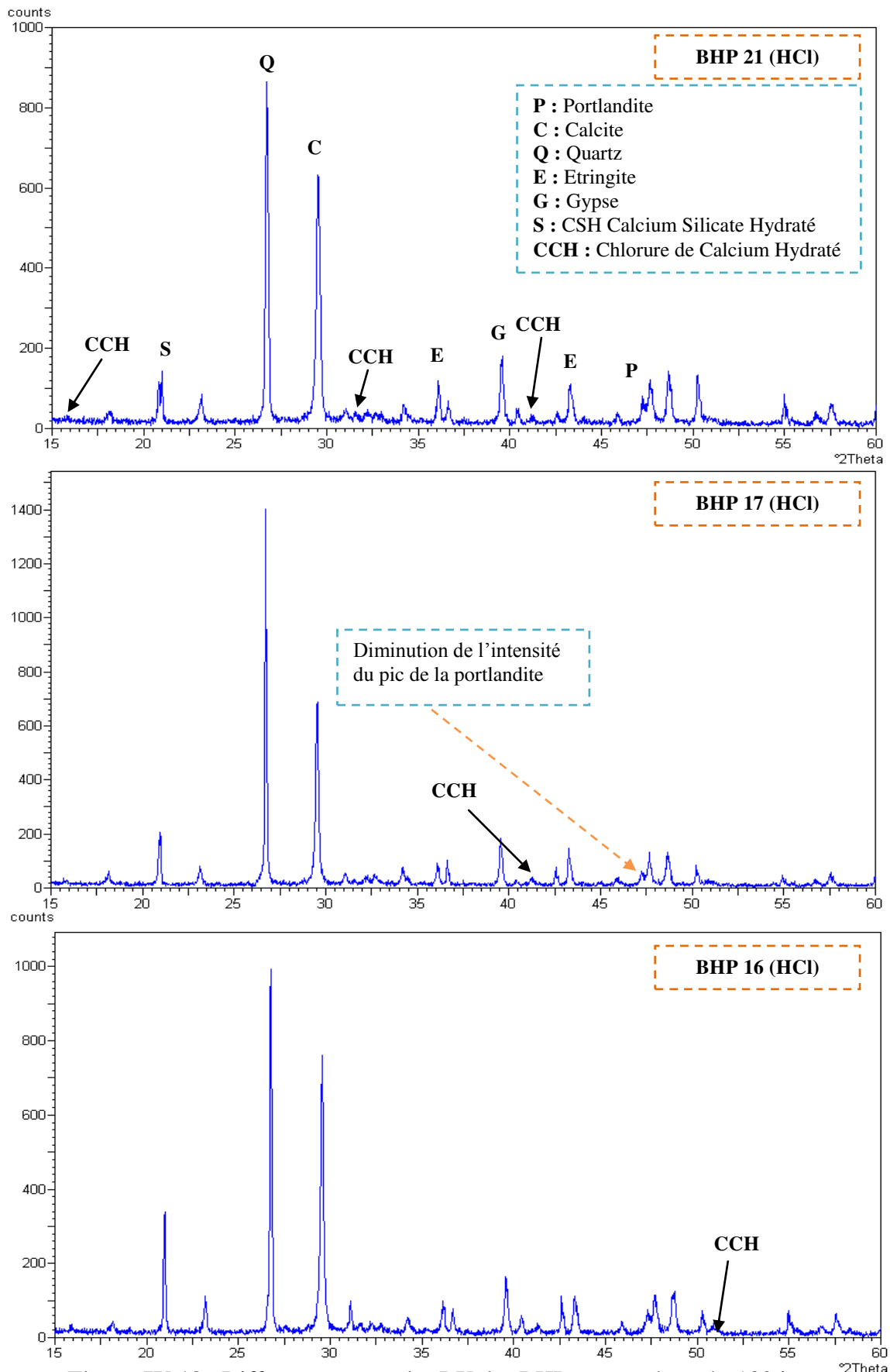


Figure IV.18 : Diffractogramme des RX des BHP conservés après 180 jours d'immersion-séchage dans la solution de 3% de HCl.

Les spectres de la même figure montrent, également, une intensité légèrement inférieure du pic de la portlandite de BHP17 par rapport à celui du BHP21. Ce qui cause une diminution progressive de la quantité de portlandite Ca(OH)_2 due à sa consommation par la réaction pouzzolanique du SDB. Cette diminution est claire surtout à la position 47.24° .

Le pic le plus intense se situe à 26.68° dans tous les BHP testés, ce qui caractérise la présence de quartz, due à l'incorporation du sable alluvionnaire et de SDB de natures siliceuses qui font augmenter le taux du quartz. Le BHP17 présente une intensité du pic de quartz la plus élevée qui est de l'ordre de 1400, suivie de celle du BHP16 de l'ordre de 1000, ensuite du BHP21 qui présente l'intensité la plus basse de 920.

Les diagrammes des R.X montrent des pics de calcite avec des intensités élevées notamment pour le pic $29,46^\circ$.

Les spectres des rayons X des trois types de BHP confirment la formation du gypse et de l'ettringite suite à l'attaque acide. Les pics identifiant le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sont situés à 31.07° ; 39.61° et 50.37° et les pics qui identifient l'ettringite (E : $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) sont à 36.11° et 46° .

IV.3. CONCLUSION

A la lumière de ce qui a été présenté dans ce chapitre, on remarque que l'incorporation du SDB et du FC contribue d'une façon positive sur les performances mécaniques et la durabilité des BHP. Ils offrent une résistance aux acides et aux sulfates meilleures en comparaison avec le BHP de contrôle.

L'étude de la durabilité a permis de montrer que l'apport de SDB et de FC à un effet supplémentaire sur le comportement des BHP qui se manifeste par la fixation de l'hydroxyde de calcium par l'ajout de SDB, la diminution de la porosité de la pâte de ciment durcie qui freine la pénétration des agents agressifs et aussi par l'augmentation de la résistance mécanique.

Il faut aussi noter que, même après 180 jours de conservation dans les milieux agressifs, les caractéristiques mécaniques de ces bétons à hautes performances ne sont pas affectées par les dégradations, probablement grâce à la très faible porosité qui constitue une barrière contre la pénétration des agents agressifs dans le matériau.

Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse nous ont conduits à tirer plusieurs conclusions et remarques importantes.

Tout d'abord, les synthèses bibliographiques nous ont permis de mettre en évidence que l'appellation « béton à haute performance » donne à penser qu'il s'agit d'un matériau de haute technologie dont les propriétés, les performances et les possibilités d'application continuent de nous étonner. Il est plutôt perçu comme un nouveau type de béton. D'autre part, nous nous sommes intéressés aux propriétés exceptionnelles des BHP qui procèdent essentiellement de leur grande résistance à la compression et leur faible porosité. Cette dernière caractéristique physique apparaît clairement lorsque l'on compare des micro-photos de sections de béton ordinaire et de BHP. Ensuite le BHP a été défini comme un béton ayant une plus grande durabilité du fait du faible rapport 'E/C' qui constitue l'apport essentiel de ces matériaux. C'est cette propriété qui, plus que toute autre, sera à l'origine de la généralisation de leur emploi.

La comparaison entre le béton à hautes performances et le béton usuel a révélé que les BHP présentent des résistances mécaniques 2 à 3 fois plus élevées, grâce à leur meilleur comportement dans le temps. Ils sont généralement très compacts et donc très peu perméables d'où l'amélioration des caractéristiques de durabilité.

Par ailleurs, une analyse bibliographique sur les constituants des BHP a montré que ces derniers nécessitent l'emploi de ciments bien choisis avec des dosages importants, des granulats choisis avec précaution, de la fumée silice, parfois d'autres additions minérales comme des cendres volantes ou du laitier de haut-fourneau granulé broyé, etc., du superplastifiant et de l'eau. Et il n'est pas utile d'utiliser des granulats spéciaux dans leurs fabrications à condition que ceux-ci soient propres.

La nature du gros granulats est certainement le facteur qui influence la résistance d'un BHP. D'ailleurs, l'amélioration des caractéristiques mécaniques et élastiques de ce béton est basée sur le choix des gros granulats qui peuvent constituer le maillon le plus faible.

La fabrication du BHP suppose l'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau qui ont créé la base du développement des bétons à hautes performances en garantissant une bonne maniabilité et assurent une meilleure répartition des grains de ciment. Cette répartition favorise leur hydratation et permet d'obtenir une résistance considérablement accrue, ce qui permet d'alléger les structures de certains bâtiments et d'envisager des ouvrages de plus grands.

Dans cette partie d'étude, on a présenté aussi l'influence des ajouts cimentaires sur les caractéristiques des BHP. D'après les études réalisées par certains chercheurs, les ajouts cimentaires ont des influences plus ou moins marquées sur les propriétés, tant à l'état frais qu'à l'état durci du BHP.

De plus, on a exposé dans l'étude bibliographique, la formulation des BHP qui ne relève pas uniquement du plus pur empirisme, elle s'appuie plutôt sur un certain nombre de résultats de l'expérience et sur la méthode de calcul dite des volumes absolus. La formulation des BHP

est donc plus délicate que pour les bétons traditionnels et relève encore plus d'un art que d'une science.

Nous avons mis l'accent ensuite, sur la caractérisation des matériaux de base employés et les techniques expérimentales utilisés. On a identifié tous les matériaux utilisés au cours de cette étude et on a donné une brève présentation des principales techniques expérimentales utilisées.

Les travaux réalisés ont également conduit à optimiser la formulation des BHP à base de matériaux locaux de la région de Laghouat (Algérie) en utilisant une nouvelle méthode appelée "plans d'expériences". Les résultats des essais de formulation et de modélisation du composite étudié montrent en générale, que la théorie des plans d'expériences permet une modélisation empirique d'effets des paramètres étudiés (quantité de ciment, quantité de sable de dune broyé (SDB) et quantité de filler calcaire (FC) et d'évaluer la qualité de la modélisation. Les modèles mathématiques issus de l'application de cette approche statistique ont facilité la visualisation de l'effet de chacun des facteurs étudiés sur les propriétés des BHP.

Les résultats trouvés ont montré que, globalement, l'introduction de l'addition calcaire (FC) et de l'addition siliceuse (SDB) dans le ciment (en substitution) joue un rôle bénéfique en améliorant les résistances mécaniques à moyen et long terme. Il apparaît notamment que la résistance mécanique augmente avec le pourcentage d'additions jusqu'à un optimum (5% de SDB et 5% de FC) puis diminue pour des pourcentages plus élevés.

En comparaison avec celui du béton de référence, le taux d'augmentation de la résistance à la compression du béton formulé avec 5% de SDB et de 5% de FC, est de l'ordre de 47,8 % à l'âge de 28 jours. Cependant, pour la résistance à la flexion, le gain de résistance pour les dosages optimums, est marqué par un taux de 11,6 % à l'âge de 28 jours.

Les résultats trouvés confirment également que le sable de dunes broyé n'est pas inerte et participe à la formation de nouveaux C-S-H qui rendent la pâte plus dense et plus compacte ce qui concorde parfaitement avec les résultats de la littérature.

Grâce à l'ajout des fines calcaires et de sable de dunes broyé, il a été possible d'obtenir des bétons à hautes performances de bonne ouvrabilité. Le béton avec ajout de 5% de calcaire présente un affaissement au cône d'Abrams de 14 cm contre 9 cm présenté par le béton de référence ; alors que les bétons avec ajout de calcaire et de sable de dunes broyé présente des affaissements intermédiaires (7,5 cm et 14 cm).

Du point de vue économique, les résultats obtenus du BHP avec 25% d'ajouts de SDB et de FC sont très encourageants. En effet, il a été possible de développer des résistances à la compression acceptables à long terme en utilisant des additions minérales de bas prix : le sable de dune est disponible naturellement en grandes quantités et ne nécessite que le broyage sans aucun traitement supplémentaire et le FC n'est obtenu que par le tamisage des déchets de concassage des calcaires.

L'analyse des résultats de la partie consacrée aux essais de la durabilité de bétons à hautes performances vis-à-vis de différents milieux agressifs, montre clairement que l'incorporation du SDB et du FC contribue d'une manière positive sur les performances mécaniques et la durabilité des BHP. Ces ajouts offrent une meilleure résistance des BHP aux acides et aux

sulfates en comparaison avec le BHP de contrôle. Ceci est dû à la formation des C-S-H supplémentaires issus de la réaction pouzzolanique d'une part et d'autre part à la dilution des aluminates et la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compacts.

En ce qui concerne la variation de masse en fonction de la période des cycles d'immersion-séchage dans les différents milieux, à savoir : l'eau saturée en chaux, une solution de 10 % de $MgSO_4$ et une solution de 3 % d'HCl :

- ❖ Tous les bétons conservés dans l'eau saturée en chaux présentent un accroissement progressif de gain en leurs masses respectives. Ce gain évolue d'une manière régulière pour tous les bétons en fonction de la durée d'immersion. Les BHP avec ajout de SDB et FC présentent des gains moins importants que celui du BHP témoin.
- ❖ Les résultats obtenus indiquent une expansion dans les BHP conservés dans la solution de 10 % de $MgSO_4$ en procédant par protocoles accélérés de dégradation. Ces résultats montrent aussi que l'incorporation du SDB et du FC dans les BHP conduit à une diminution de l'expansion des BHP et retarde l'attaque du sulfate de magnésium par rapport au BHP de contrôle.
- ❖ Une perte continue de masse a été observée dans le cas des BHP immergés dans la solution contenant 3 % d'acide chlorhydrique. L'introduction de SDB et de FC dans les BHP réduit cette perte de masse par rapport au BHP de contrôle. Le BHP contenant 5% de SDB et 5% de FC développe la plus grande aptitude de résistance aux attaques acides (HCl).

L'exploitation des résultats de l'évolution des résistances à la compression et à la flexion des BHP en fonction de leur âge, durant la période des cycles « immersion-séchage » dans les différents milieux, montre que :

- ✚ La substitution d'une partie du ciment par le SDB et le FC conduit à une augmentation des résistances mécaniques à long terme en fonction de la durée des cycles « immersion-séchage » dans l'eau saturée en chaux qui est notablement plus rapide pour les BHP avec additions minérales que celle du BHP de référence.
- ✚ L'ajout de SDB et de FC a un effet bénéfique sur la résistance à l'agressivité des BHP soumis à des cycles d'immersion-séchage dans une solution de 10 % de sulfate de magnésium. En effet, les BHP avec ajouts conservent leur résistance mécanique dans l'environnement sulfatique.
- ✚ Les BHP avec ajouts de SDB et de FC, testés dans 3% de HCl en fonction de la période des cycles immersion-séchages paraissent plus résistants que le BHP de référence ; cet exploit s'explique par le déclenchement de la réaction pouzzolanique du SDB et l'effet de remplissage du calcaire et de densification de la matrice cimentaire par ces ajouts qui a également apporté une résistance mécanique importante aux bétons dans les milieux agressifs. Le sable de dune finement broyé et les fillers calcaires offrent également une bonne protection contre l'agressivité d'acide chlorhydrique.

Les résistances à la compression et à la flexion de tous les BHP conservés dans les solutions de $MgSO_4$ et HCl sont inférieures à celles des spécimens conservés dans l'eau saturée en chaux.

Il est aussi à constater que les résistances à la compression et à la flexion sont plus ou moins affectées par les milieux agressifs et restent toujours supérieures à 50 MPa quel que soit le milieu de conservation.

D'autre part, le suivi de la variation dimensionnelle des différents BHP soumis à des cycles d'immersion-séchage dans les trois milieux de conservation montre :

- ✚ Un retrait pour les BHP conservés dans le milieu acide (3% de HCl) et une expansion pour les BHP conservés dans la solution de 10% de MgSO₄ et dans l'eau saturée en chaux.
- ✚ La présence du SDB et du FC dans la formulation du BHP a réduit le retrait et a abaissé l'expansion des BHP causée par l'attaque sulfatique.
- ✚ Les BHP avec ajouts de SDB et de FC se comportent mieux en milieux agressifs et présentent un retrait moins important et de faibles expansions qu'un BHP de référence et diffèrent l'un de l'autre jusqu'à une durée d'immersion-séchage de 180 jours.
- ✚ La contribution de l'ajout de SDB se manifeste par la formation d'un béton durci plus compacte, à cause des gels appelés gels de deuxième génération, issus de la réaction entre la silice du SDB et la chaux des fillers calcaires et les produits d'hydratation du ciment.
- ✚ Pour les BHP conservés dans l'eau saturée en chaux tout au long des cycles d'immersion-séchage, l'évolution du changement de la longueur en fonction du temps ne permet pas d'affirmer que les échantillons soumis à l'immersion-séchage n'ont pas subi une expansion élevée.

En effet, après 180 jours d'immersion-séchage dans les différentes solutions, l'analyse visuelle montre que les BHP avec ajouts de SDB et de FC ne sont pas affectées de façons très sensibles et ne révèle aucun signe de dégradation. Ceci confirme la bonne tenue de ces derniers dans les milieux agressifs. En outre, la méthode d'analyse au DRX a permis de montrer l'évolution et le changement de la phase minérale et par conséquent de la microstructure des BHP étudiés en contact avec la solution de MgSO₄ et la solution de HCl. Cependant, les résultats de l'analyse par DRX confirment l'influence positive de l'ajout du SDB et du FC par substitution dans le ciment dans les milieux agressifs.

En résumé, avec le logiciel JMP®, élaboré par la société *SAS institute Inc*, qui est particulièrement bien adapté pour la construction et l'analyse des plans d'expériences, nous avons pu analyser et interpréter les résultats trouvés dans notre travail. Les résultats montrent également que les modèles ajustés sont de bonnes qualités et donnent des informations importantes concernant les effets de chacun des paramètres considérés ; des graphes isoréponses, traduisant en courbes les modèles mathématiques trouvés, ont pu également valider les différentes informations remarquées.

En effet, le faible rapport E/C et la substitution d'une partie de ciment par l'ajout de SDB et de FC, ont conduit à la protection des bétons élaborés, contre les agressions chimiques, en réduisant leur porosité, et par voie de conséquence, le transfert des éléments agressifs dans la solution interstitielle des bétons.

Dans le présent travail, on s'est intéressé à l'application de l'approche des plans d'expériences et aux propriétés des bétons à hautes performances contre les agressions chimiques. Il serait intéressant de pouvoir étudier l'applicabilité de cette nouvelle approche

statistique pour optimiser la formulation des autres bétons, ainsi que de continuer l'étude de la durabilité des bétons à hautes performances à bases de fines de sable de dune broyées et de déchets de concassage de roches calcaires contre d'autres milieux chimiquement agressifs, telles que la carbonatation, et les l'attaque par d'autres sels et d'autres acides inorganiques et acides organiques et l'étude de la corrosion des armatures.

De nouvelles études pourront faire suite à ce travail en envisageant de faire varier des paramètres tels que les matériaux constitutifs des formulations (d'autres ajouts, d'autres sources de granulats, de ciment, d'adjuvants..) et d'estimer leur influence sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques des BHP.

Afin de mieux comprendre les différentes facettes du comportement de ce nouveau type de béton et de comprendre l'effet de chacun des facteurs étudiés du mélange sur les caractéristiques de ce béton, il serait également intéressant d'étudier d'autres propriétés à l'état frais et à l'état durci (par exemple : l'effet de la surface spécifique des ajouts, masse volumique; vitesse de propagation d'onde sonore, résistance à la fatigue, l'endommagement, le module d'élasticité, fluage, etc.).

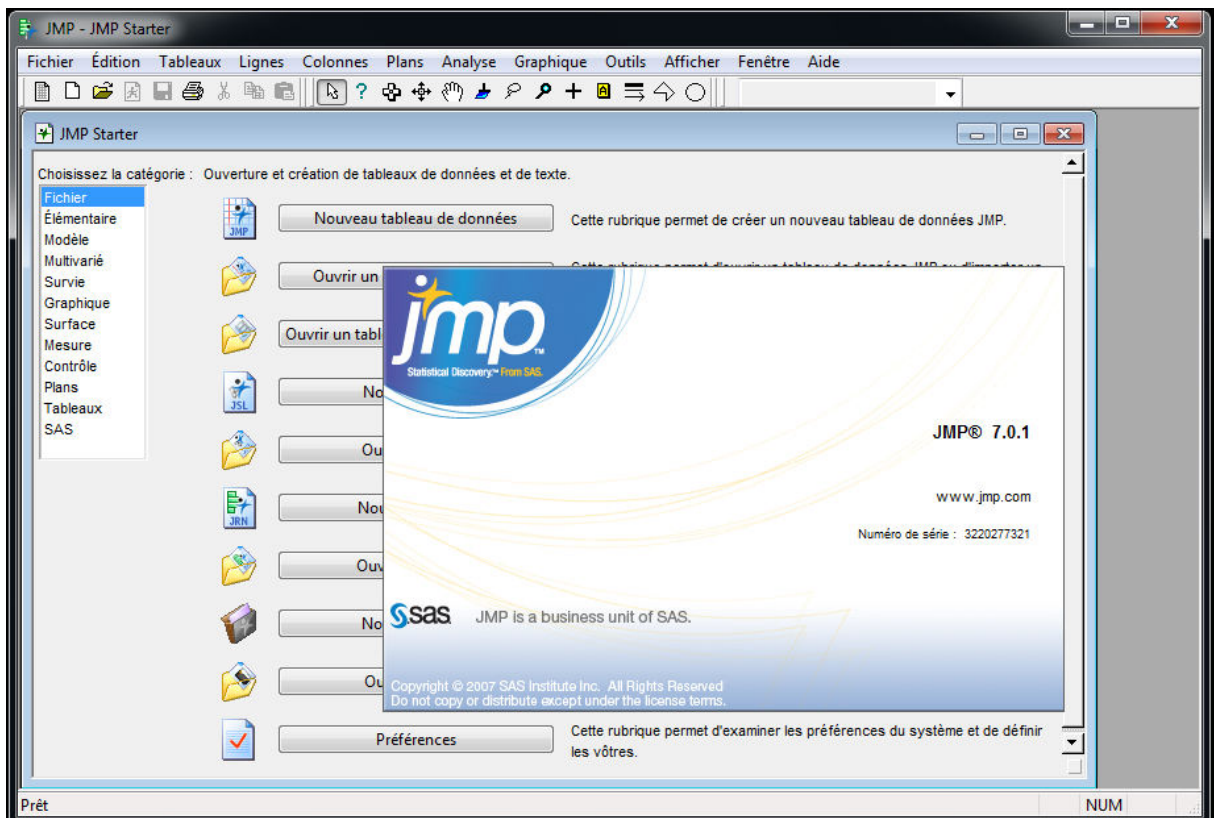
Enfin, une étude plus approfondie des caractéristiques microscopiques des BHP peut être envisageable dans la mesure où des différences observées au niveau macroscopique sur certaines propriétés matérielles le nécessitent.

Annexe

ANNEXE

TRAITEMENT DE PROBLÈMES DE MÉLANGE AVEC JMP7

Page d'accueil du logiciel JMP7



✚ Choisir le plan

JMP vous propose plusieurs plans. Ici, choisissez le cinquième plan (Plans de mélanges).

✚ Entrer les réponses

Sélectionnez **Plans > Plans de mélanges**. Lorsque la boîte de dialogue apparaît, double-cliquez sur le nom de la réponse, Y, et entrez **Rc 28 j (résistance à la compression à 28 jours)**.

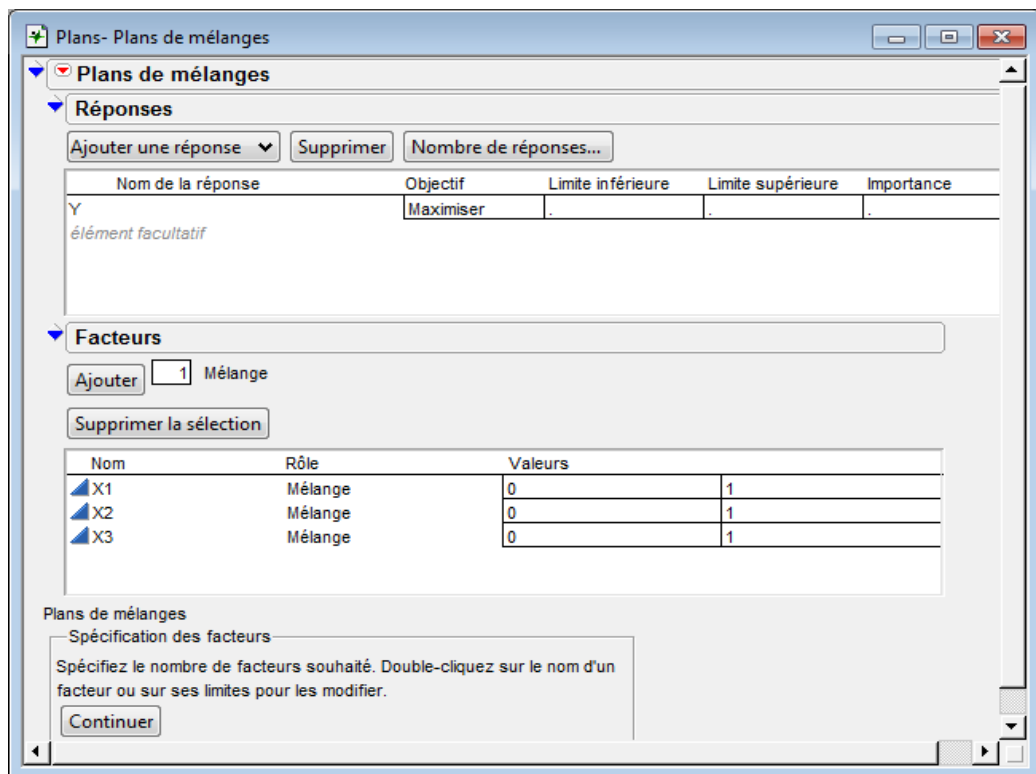
✚ Entrer les facteurs

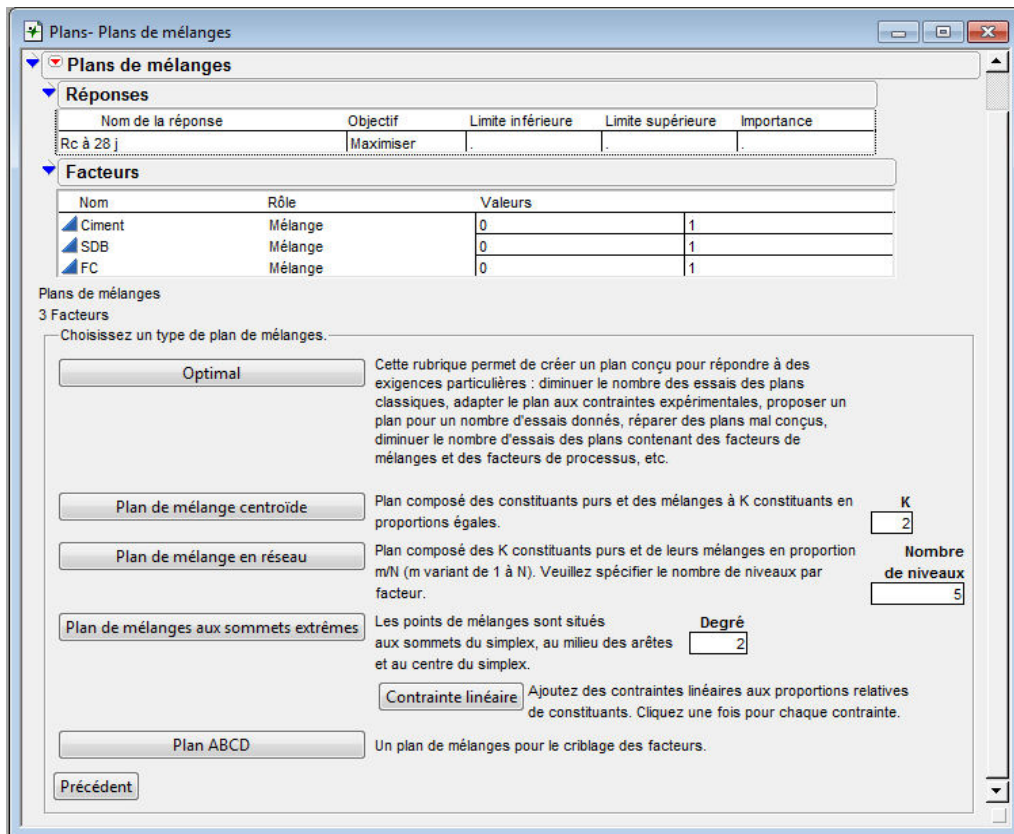
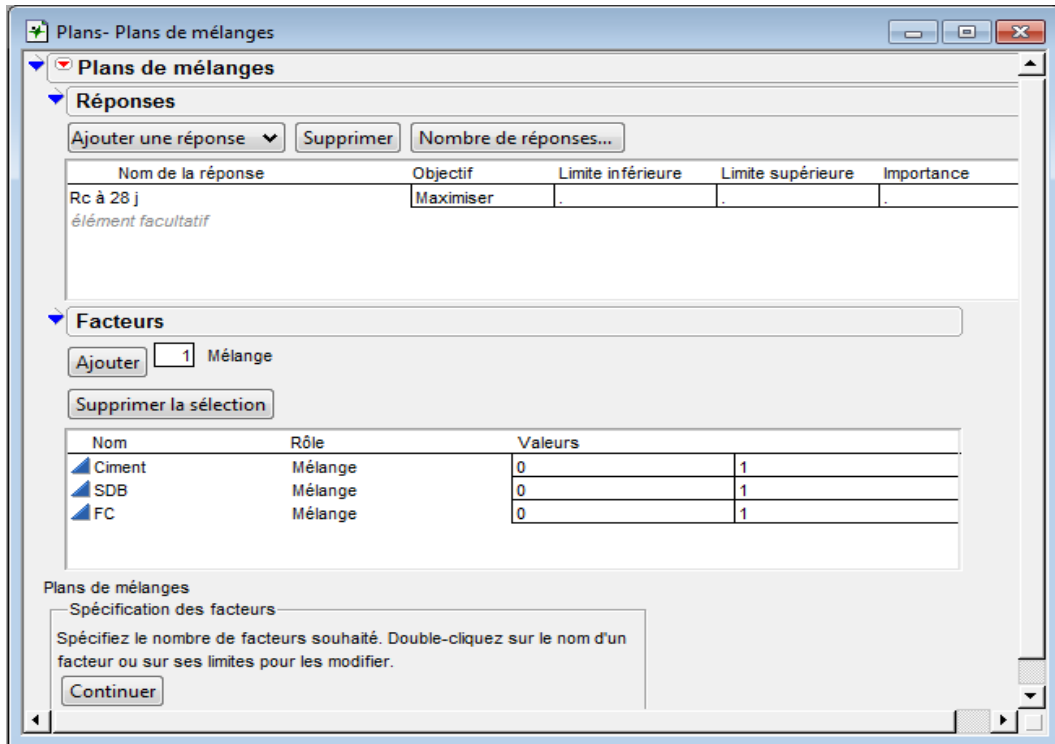
Dans la rubrique « **Facteurs** », entrez le chiffre 3 (nombre de facteurs) devant « **Continuer** » et cliquez sur le bouton « **Ajouter** » pour introduire deux facteurs.

✚ Modifier le nom des facteurs

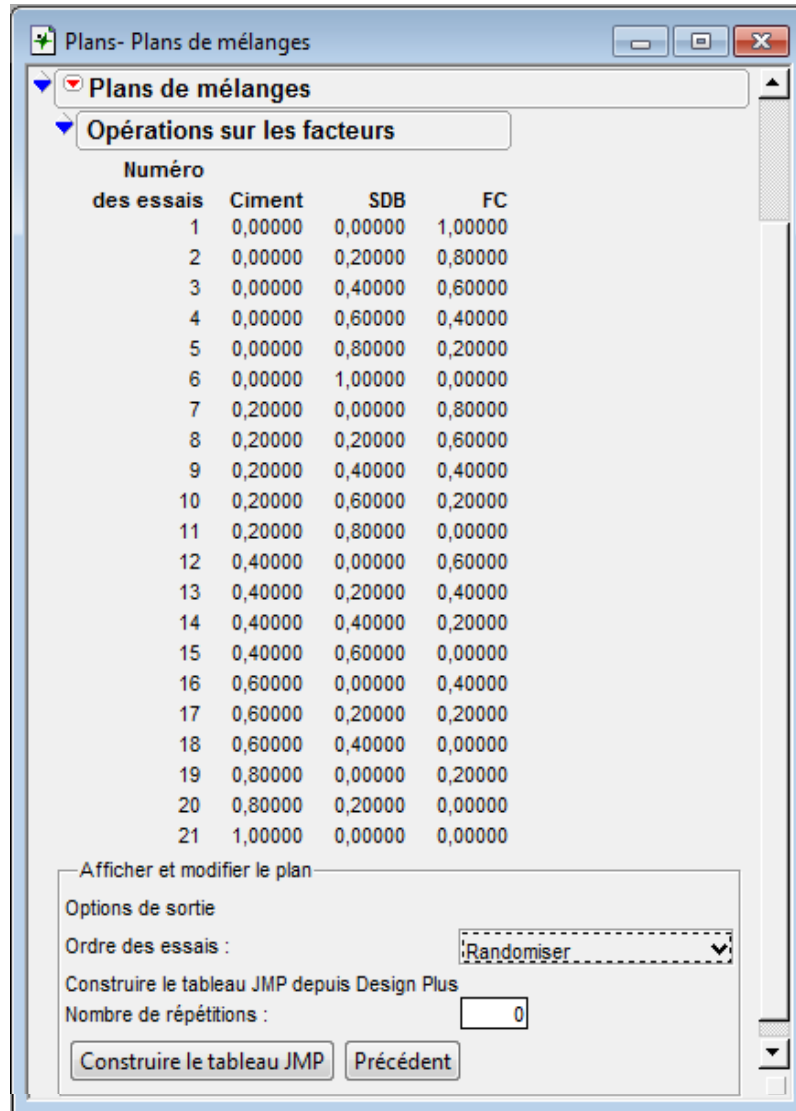
Double-cliquez sur 'X₁' et modifiez-le en le remplaçant par 'Ciment'.

Répétez cette opération pour 'X₂' et 'X₃' en les remplaçant par 'SDB' et FC respectivement. Cliquez sur le bouton « **Continuer** » pour passer à la rubrique suivante.





- ✚ Vous devez maintenant sélectionner l'ordre des essais. « **Randomiser** » est le choix par défaut. Ici, choisissez « **Garder le même ordre ou Trier de gauche à droite** ».



Plans- Plans de mélanges

Plans de mélanges

Opérations sur les facteurs

Numéro des essais	Ciment	SDB	FC
1	0,00000	0,00000	1,00000
2	0,00000	0,20000	0,80000
3	0,00000	0,40000	0,60000
4	0,00000	0,60000	0,40000
5	0,00000	0,80000	0,20000
6	0,00000	1,00000	0,00000
7	0,20000	0,00000	0,80000
8	0,20000	0,20000	0,60000
9	0,20000	0,40000	0,40000
10	0,20000	0,60000	0,20000
11	0,20000	0,80000	0,00000
12	0,40000	0,00000	0,60000
13	0,40000	0,20000	0,40000
14	0,40000	0,40000	0,20000
15	0,40000	0,60000	0,00000
16	0,60000	0,00000	0,40000
17	0,60000	0,20000	0,20000
18	0,60000	0,40000	0,00000
19	0,80000	0,00000	0,20000
20	0,80000	0,20000	0,00000
21	1,00000	0,00000	0,00000

Afficher et modifier le plan

Options de sortie

Ordre des essais : Randomiser

Construire le tableau JMP depuis Design Plus

Nombre de répétitions : 0

Construire le tableau JMP Précédent

✚ Construire le plan

Cliquez sur le bouton « **Construire le tableau JMP** » pour générer votre plan sous la forme d'un tableau : les facteurs sont en colonnes et les résultats d'essais (réponses) en lignes. La colonne des réponses sera remplie après l'exécution des expériences pour pouvoir effectuer l'analyse des résultats.

The screenshot shows the 'Plan de mélange en réseau' (Network Mixture Design) window in JMP. The window title is 'Plan de mélange en réseau'. On the left, there is a sidebar with a tree view showing 'Plan de mélange en rés', 'Plans Plan de mélange en', and 'Modèle'. Below this, there are sections for 'Colonnes (4/0)' and 'Lignes'. The 'Colonnes' section lists 'Ciment *', 'SDB *', 'FC *', and 'Rc à 28 j *'. The 'Lignes' section shows 'Toutes les lignes' with a count of 21, and 'Sélectionnée(s)', 'Exclue(s)', 'Masquée(s)', and 'Étiquetée(s)' all with counts of 0. The main area is a table with 21 rows and 5 columns. The columns are 'Ciment', 'SDB', 'FC', and 'Rc à 28 j'. The first column contains row numbers from 1 to 21. The 'Rc à 28 j' column contains a small black dot in each row.

	Ciment	SDB	FC	Rc à 28 j
1	0	0	1	•
2	0	0,2	0,8	•
3	0	0,4	0,6	•
4	0	0,6	0,4	•
5	0	0,8	0,2	•
6	0	1	0	•
7	0,2	0	0,8	•
8	0,2	0,2	0,6	•
9	0,2	0,4	0,4	•
10	0,2	0,6	0,2	•
11	0,2	0,8	0	•
12	0,4	0	0,6	•
13	0,4	0,2	0,4	•
14	0,4	0,4	0,2	•
15	0,4	0,6	0	•
16	0,6	0	0,4	•
17	0,6	0,2	0,2	•
18	0,6	0,4	0	•
19	0,8	0	0,2	•
20	0,8	0,2	0	•
21	1	0	0	•

	Ciment	SDB	FC	Rc à 28 j
1	0	0	1	49,12
2	0	0,2	0,8	50,08
3	0	0,4	0,6	44,95
4	0	0,6	0,4	46,04
5	0	0,8	0,2	48,41
6	0	1	0	47,49
7	0,2	0	0,8	54,72
8	0,2	0,2	0,6	55,26
9	0,2	0,4	0,4	58,03
10	0,2	0,6	0,2	52,01
11	0,2	0,8	0	56,94
12	0,4	0	0,6	58,68
13	0,4	0,2	0,4	64
14	0,4	0,4	0,2	60,71
15	0,4	0,6	0	62,88
16	0,6	0	0,4	67,02
17	0,6	0,2	0,2	73,19
18	0,6	0,4	0	71,46
19	0,8	0	0,2	65,57
20	0,8	0,2	0	68,43
21	1	0	0	61,17

✚ Analyse d'un plan de mélanges :

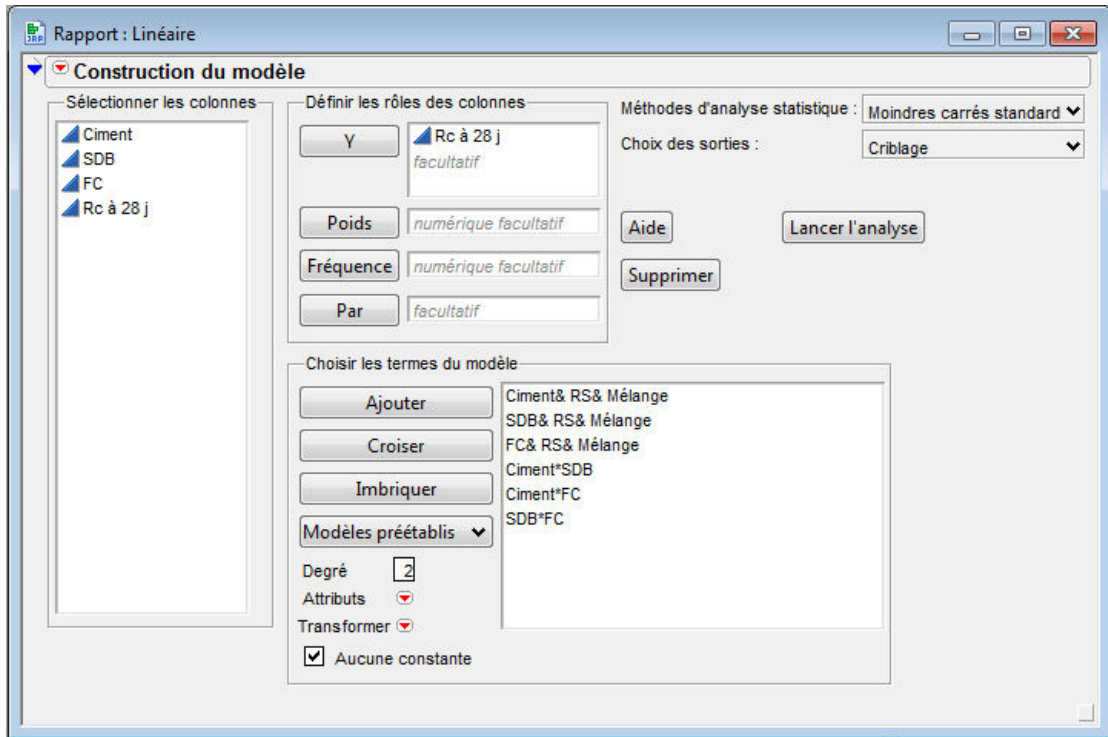
Un script appelé « **Modèle** » a été enregistré dans le panneau supérieur gauche du tableau de données. Ce script contient le modèle du plan qui a été créé pour l'estimation.

Cliquez sur le hot spot situé à côté de '**Modèle**', puis sélectionnez « **Exécuter le script** ».

Une nouvelle fenêtre « **Construction du modèle** » apparaît. Un modèle est proposé et prêt à être exécuté.

Vous avez maintenant le choix entre accepter le modèle et l'exécuter tel quel, ou le modifier avant de l'exécuter.

Cliquez sur le bouton « **Lancer l'analyse** » dans la fenêtre « **Construction du modèle** ».



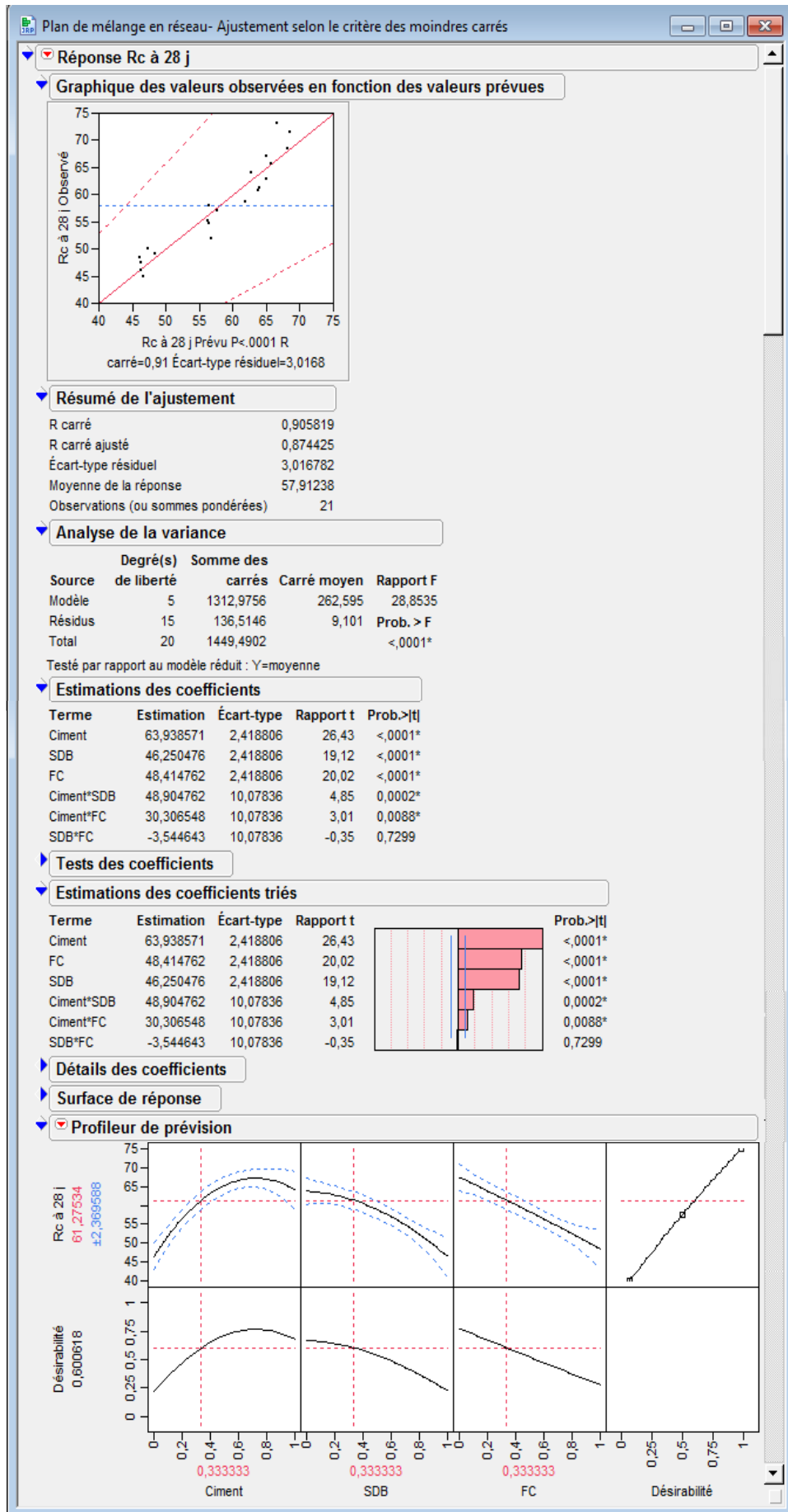
✚ Résultats de l'analyse :

Le rapport estimations des coefficients est idéal pour vérifier la valeur des coefficients du modèle et leurs significativités statistiques.

Le Profileur de prévision situé en bas permet d'analyser la surface de réponse.

Les paramètres de réponse par défaut supposent que vous souhaitez maximiser la réponse. Ils figurent dans les paramètres de Désirabilité.

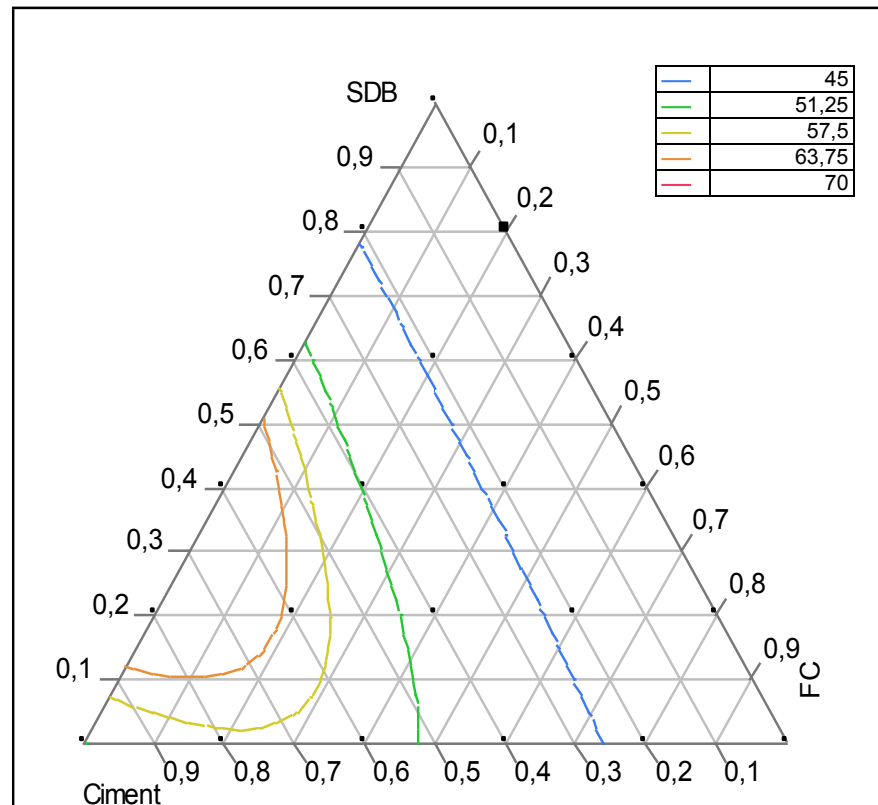
Cliquez sur le hot spot dans « **Profileur de prévision** », puis choisissez « **Maximiser la désirabilité** ». Ce profileur trouve les niveaux des facteurs qui maximisent le rendement prévu.



✚ Dessin des surfaces de réponses

Sauver les formules de prédiction des réponses à partir de la fenêtre des résultats du modèle. Utiliser ensuite l'option « **Graphique Ternaire** ». A ce stade il semble y avoir un bug qui empêche de dessiner les courbes directement du fait que le modèle comprend une variable quantitative.

Voici après quelques manipulations : la courbe iso-réponse de la résistance de la compression à 28 jours.



FICHE TECHNIQUE DU CIMENT BLANC

FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT ML.C v02

MALAKI
Ciment pour béton et mortier colorés
CPJ- CEM II/A-L 52,5N NA 442



MALAKI est un ciment blanc à hautes résistances initiales et finales, issu du broyage d'un clinker blanc.

Il est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO²) à caractère acide.. ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MALAKI présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442.

Domaine d'utilisation :

Il est possible d'utiliser **MALAKI** comme suit :

Béton structurel, béton coloré ;

Fabrication des carreaux de dalle ;

Enduit, revêtement de façade, pose faïences et équipements sanitaires ;

Accessoires de décoration ;

Éléments de décoration, balustrades, colonnes ; carreaux mosaïques, margelles de piscine, allées de jardins....

Algerian Cement Company (SPA)

Direction générale

Ciment Blanc Algérien (SPA)

 Hammam Dalaa, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

 33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

 Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél./ Fax : +213 (0) 45 84 88 98


MALAKI
Ciment pour béton et mortier colorés
CPJ- CEM II/A-L 52,5N NA 442



Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	4.50 – 7.50
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,30 – 0,80
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,90
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	0,30 – 2,10
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,02 – 0,09
Cr VI (ppm)	< 1

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C3S (%) :	50,00 – 60,00
Silicates bicalciques C2S (%) :	15,00 – 30,00
Aluminates tricalciques C3A (%) :	07,50 – 09,00
Aluminoferrites tetracalciques C4AF (%) :	0,50 – 0,75

Propriétés physiques

Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4 700 – 5 200
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,50 – 1,50
Whiteness L* (%)	93 - 96
(CIE 1931) Y (%)	84.5 - 89

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	130 - 200
Fin de prise (min)	200 - 260

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	30.00 – 38,00
28 jours (MPa)	≥ 55

Algerian Cement Company (SPA)

Hammiyam - Dalaat, M'sila (ACC)
Tél: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 88

LAFARGE
لافارج

FICHE TECHNIQUE DE L'ADJUVANT

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.

**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau**

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

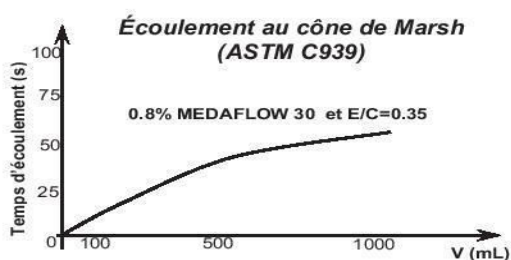
DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :
Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

58



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).

- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitenaire 1100kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).
Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Avril 2005.

NB : Les produits à base de polycarboxylates d'Ether (PCE), exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

**Granitex**

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél: (213) 021 51 66 81 & 82

Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



59

4. PROGRAMME DE MESURE DE DRX

The screenshot shows the 'Measurement Conditions' tab of the X'Pert software. The main area contains a table with the following data:

Diffraction measurement	Zaitri BHP 17 MgSO4
Measurement program	Pr 15-60 t= 20min
Measurement type	Absolute scan
Application offset: 2Theta (°)	0.00000
Application offset: Omega (°)	0.00000
Scan axis	Gonio
Scan mode	Continuous
Control unit	Pw3040
Goniometer	Pw3050/60 (Theta/Theta)
Generator	Pw3040 (mppc)
Generator tension (kV)	40.0
Generator current (mA)	50.0
X-ray tube	Pw3373/00 Cu LFF
Tube focus	Line
Take off angle (°)	6.00000
Used radiation	K-Alpha1
K-Alpha1 wavelength (Å)	1.54056
K-Alpha2 wavelength (Å)	1.54439
K-Alpha2/K-Alpha1 intensity ratio	0.5000
K-Beta wavelength (Å)	1.39222
Beam attenuator	None
Beam attenuator activated	No

On the right side of the dialog box, there are buttons for OK, Cancel, Save As..., Print, and Help.

At the bottom of the dialog box, there are input fields for *2Theta, d (Å), counts, and an anchor field showing 'Anchor: Zaitri BHP 17 MgSO4 (Scan: measured)'.

The Windows taskbar at the bottom shows the system tray with the time 4:14 PM and several open applications including Démarrer, X'Pert, PCPDF, SEARCH, and Docum...

Bibliographie

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **S.M.A. Boukli Hacene, F. Ghomari, F. Schoefs et A. Khelidj** : « Etude expérimentale et statistique de l'influence de l'affaissement et de l'air occlus sur la résistance à la compression des bétons », *Lebanese Science Journal*, Vol. 10, No. 2, 2009.
- [2] **Sidi Mohammed El Amine BOUKLI HACENE, 2009** : « Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen », Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.
- [3] **Stéphan ASSIÉ, 2004** : « Durabilité des bétons autoplaçants », Thèse de doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées INSA, Toulouse, France.
- [4] **Lakhal Ridha** : « Elaboration des BHP à base des sous produit locaux : formulation et caractérisation physico-mécanique », Mémoire de magistère, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2011.
- [5] **Mustapha CHEIKH ZOUAOU, 2008** : « Contribution à l'étude de la cinétique d'hydratation au jeune âge des bétons à hautes résistances », Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France, et Université de Constantine, Algérie.
- [6] **Aitcin P C, 1995** : « Developments in the application of high-performance concretes », *Construction and building materials*, Vol. 9, No. 1, 1995.
- [7] **MALIER Y** : « Les bétons à hautes performances — Du matériau à l'ouvrage », Presses de l'ENPC, Paris, 1990, 2e éd., 550 p.
- [8] **MALIER Y** : « The French Approach to using HPC », *Concrete International*, American Concrete Institute, New York, July 1991, Vol 13, n° 7, p. 28-33
- [9] **Aitcin C P** : « Bétons Haute Performance », Edition Eyrolles, ISBN 2-212-01323-X, 683 pages, Paris (2001).
- [10] **Helland S.**, « Utilization of HP », In : *Fourth International Symposium on the utilization of high strength-high performance concrete*, Edited by F. De Larrard and R. Lacroix, Paris, 1996, p.67-81.
- [11] **Malier .Y** : « Les Bétons à Hautes Performances : caractérisation, durabilité, applications », Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1992).
- [12] **Richard P.**, « The futur of HS-HPC », In : *Fourth International Symposium on the utilization of high strength-high performance concrete*, Edited by F. De Larrard and R. Lacroix, Paris, 1996, p.101-106.
- [13] **BAEL 91** : « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la règle des états limites », Paris, 151P, Mai 1991.
- [14] **BAEL 99** : « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites », fascicule n°62 – Titre 1^{er} – Section I, BAEL 91 révisé 99, avril 1999.
- [15] **Additif au fascicule N° 65 A** : « Exécution des ouvrages des génie civil en béton armé ou en béton précontraint », Cahier des clauses techniques générales ; Bulletin officiel ; Aout 2000.
- [16] **M.Chemrouk** : « Etude des Ingrédients du Mélanges pour formuler un Béton Hautement Performant et Durable », 1^{er} séminaire sur les technologies du béton : le Béton, Perfection et Incertitudes ; 18-19 Septembre 2004, Alger.
- [17] **CIMbéton** : « Bétons et Génie Civil - Les nouvelles solutions des bétons prêts à l'emploi », Centre d'information du ciment et ses applications, T43, 66 p, Mai 2005.

- [18] **Bulletin FEBELCEM** : « Béton à haute performance » Fédération de l'industrie cimentière belge , n° 280/03 , juillet 2007 .
- [19] **A Neville , Aitcin C P** : « High performance concrete – An overview », *Materials and structures* , 31, n° 206, p 111-117 , 1998.
- [20] **Lounis, Z.** : « Analyse du cycle de vie et durabilité des ouvrages en béton à haute performance », Conseil national de recherches Canada (CNRC)
- [21] **Lounis, Z. Raki, L. Daigle, L. Zhang, J.Y** : « L'IRC lance un projet de recherche sur l'analyse du cycle de vie et la durabilité des structures en béton à haute performance », *Innovation en construction* Institut de recherche en construction du Conseil national de recherches Canada (IRC – CNRC), 9 (4) pp. 7, 2004.
- [22] **F.Larrard**, « Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances » ; rapport de recherche LCPC ; n°149, 1988, France.
- [23] **M. Mouli** : « Etude des propriétés physiques et mécaniques de la pouzzolane en vue de la fabrication des bétons légers et des bétons à haute performance », Thèse de doctorat d'état, université Mohammed BOUDIAF (USTMB) d'Oran, décembre 2006.
- [24] **Synergie** : « Avantage BCR sur toute la ligne », publication de Ciment-Québec inc, Aout 2003.
- [25] **Légeron F ; Mazars J** : « Comportement sismique des structures en béton ordinaire et en béton à haute performance », Thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, France, 1998.
- [26] **Holcim** : « Les solutions Bétons Hautes Performances », Direction Marketing Applications (DMA), Mai 2007.
- [27] **CIM béton** : « Les bétons : formulation fabrication mise en œuvre », Tome 2, 134p.
- [28] **Pierre-Claude Aitcin** : « Developments the application high-performance concretes », *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 1, pp. 13-17, 1995.
- [29] **J. Piérard, N. Cauberg** : « Développements récents dans le domaine de la technologie du béton », Journée thématique, Centre Scientifique et Technique de la Construction, février 2007.
- [30] **Georges DREUX, Jean FESTA** : « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Huitième édition, Edition Eyrolles 1998, ISBN : 2-212-10231-3.
- [31] **A.M. Neville** : « Propriétés des Bétons », Traduit par le CRIB (Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, SHERBROOKE-LAVAL), septembre 2000.
- [32] **L'institut FEEHS** : <http://www.bull-etins-electroniques.com/actualités/33759.htm>
- [33] **Bouchaboub Moussa** : « Comportement de poteaux élancés en béton armé soumis à un chargement excentré », Thèse de doctorat, Université de Constantine 1, Avril 2013.
- [34] **P.A. Gutierrez et M F Canovas** : « High performance concrete : requirements for constituent materials and mix proportioning », *ACI Materials journal*, N°93-M26 :233-241, 1996.
- [35] **M Hamrat , and M Chemrouk** : « Béton à Haute Performance : Etude expérimentale sur la formulation » ; National Seminar of Civil Engineering, Oran (Algeria), January 2003.
- [36] **B. Tighiouart , B. Benmokrane, W. Baalbaki** : « Caractéristiques mécaniques et élastiques de bétons à haute performance confectionnées avec différents types de gros granulats », *Materials and structures* , 27, p 211-217 , 1994.

- [37] **Christophe Bresciani** : « Simulation numérique de l'hydratation et du développement des propriétés physiques et mécaniques d'une pâte de ciment afin de sélectionner de nouveaux ajouts minéraux », Thèse de doctorat , Ecole nationale supérieure des Mines, Paris, France, décembre 2008.
- [38] **Matiere, Marcel** : « High performance mortar or concrete », European Patent office, EP0590210, France, Paris, 1994.
- [39] **Chaid Rabe**h : « Formulation, Caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux », Thèse de doctorat d'état, ENP, Décembre 2006.
- [40] **M. Moranville-Regourd** : « Microstructure des bétons à hautes performances », les bétons à hautes performances, édité par Y. Malier, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ISBN 2-85978-187-0 pp.25-44,1992.
- [41] **Bjanja S and Sengupta B**: « Influence of silica fume on the tensile strength of concrete », Cement and Concrete Research, University Kolkata, India, Vol 35, pp743-747, 2005.
- [42] **Wild S., Khatib J-M and Iones A** : « Relative strength, pozzolanic activity and cement hydratation in superplasticized metakaolin concrete », Cement and concrete research, vol. 26, n°10, 1996, p. 1537-1544.
- [43] **R. Duvall and E.H. Kadri** : « Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high performance concretes »,Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 4, 533–547, 1998
- [44] **Khayat, K.H. et Aïtcin, P.-C. (1993)** Silica Fume – A Unique Supplementary Cementitious Material, Mineral Admixtures in Cement and Concrete, édité par S.N. Ghosh, S.L. Sarkar et S. Harsh, ABI, Vol. 4, ISBN 81-85522-04-9, pp. 226-265.
- [45] **Matte V. & Moranville M.** : « Durability of reactive powder composites: influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes », Cem Concr Res, 21, pp. 1-9, 1999.
- [46] **Mladenka Saric-Coric , Pierre-Claude Aïtcin** : « Bétons à haute performance à base de ciments composés contenant du laitier et de la fumée de silice », Canadian journal of civil engineering, vol. 30, n°2, pp. 414-428, Canada, 2003.
- [47] **R. Lakhal, D. Achoura** : « Elaboration des bétons à hautes performances à base de laitier granulé en substitution total à la fumée de silice », SBEIDCO- 1st International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) – October 2009.
- [48] **Shi Hui-sheng, Xu Bi-wan, Zhou Xiao-chen** : « Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete », Construction and Building Materials, n° 23 pp 1980–1985, 2009.
- [49] **Patel R., Hossain K.M.A., Shehata M., Bouzoubaa N., Lachemi M.** : « Development of Statistical Models for Mixture Design of High-Volume Fly Ash Self- Consolidating Concrete », ACI Materials Journal, 101(4), pp. 294-302, 2004.
- [50] **Hui-sheng S., Bi-wan X., Xiao-chen Z.** : « Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete », Construction and Building Materials, 23, pp 1980–1985, 2009.
- [51] **R. Chaid, R. Jauberthie, A. Boukhaled, A. Talah** : « Endommagement, déformations et microstructure des BHP de pouzzolane », SBEIDCO- 1st International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) – October 2009.

- [52] **De Larrard F** : « Concrete mixture-proportioning - A scientific approach », Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON, 1999.
- [53] **Pera J , Husson S. and Guilhot B** : « Influence of finely ground limestone on cement hydration », Cement and Concrete Composites, pp. 99-105, 1999.
- [54] **Société ROCLAND** : « Additifs pour béton : Roc HP (Additif à base de silice micronique) », France, 054F/REV.01/2006.
- [55] **Nuno Almeida , Fernando Branco, Jorge de Brito, José Roberto Santos** : « High performance concrete with recycled stone slurry », Cement and Concrete Research, 37, 210–220, 2007.
- [56] **Aïtcin .C.P** : « Developments in the application of high-performance concretes » , Construction and building materials, Vol. 9, No. 1, pp. 13-17, 1995.
- [57] **Bury, Christensen** : « The role of innovative chemical admixtures in producing self consolidating concrete », Proceedings of the first North American conference on the design and use of self-consolidating concrete, Chicago, pp 141-146, 12-13 Novembre 2002.
- [58] **Aïtcin et al** : « L'interaction ciment / superplastifiant. Cas des polysulfonates », Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées , n° 233, pp 87-98, Juillet-Août 2001.
- [59] **Aïtcin.P.C et Baron.J** : « Les adjuvants normalisés pour bétons », les bétons bases et données pour leur formulation, Ed. Eyrolles, 1996.
- [60] **AMOURI Chahinez** : « Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) », Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [61] **Manai K** : « Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants », Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Sherbrooke, Canada, 1995.
- [62] **Miragliotta.R , A. Aït-Mokhtar, P. Rougeau and P. Dumargue** : « Concrete carbonation, a predicting methodology of the front advance », Proceedings of the RILEM Workshop on life prediction and aging management of concrete life, Cannes, France, (on CD-ROM), 16-17, October 2000.
- [63] **Foissy A** : « Les effets fluidifiants », Séminaire (connaissance générale du béton), ENPC , Paris, Novembre 1989.
- [64] **Pailhere A M , Serrano J et Grimaldi G** : « Influence du dosage et du mode d'introduction des superplastifiant sur le maintien de la maniabilité optimale des bétons à hautes performances avec et sans fumées de silice », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) , n° 170 , pp 37-45 , Novembre-Décembre 1990.
- [65] **Colleparidi M , Corradi M , Baldini G et Pauri M** : « Influence of sulfonated naphtalene on the fluidity of cement pastes », Proceeding of the 7th international congress on the chemistry of cement , Paris , vol 3 , pp 20-25 , 1980 .
- [66] **Ramachandran V S** : « Use of superplasticizers in concrete », Il cemento , vol 84 , pp 273-298 , 1987.
- [67] **Fontaine C** : « Le couple ciment adjuvant : comment résoudre certaines incompatibilités », 3^{ème} journée technique adjuvants , Technodes SA , Guerville , Septembre 1994 .

- [68] **Aitcin P C , Jolicoeur C et Mac Gregor J G** : « Superplasticizers : how they work and why they occasionally don't », Concrete international , pp 45-52 , May 1994.
- [69] **Ladaoui Wahid** : « Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro- Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs », Thèse doctorat, Université de Toulouse, Décembre 2010.
- [70] **Struble L , Szeesy R , LEI W G , Guo-Kuang S** : « Rheology of cement paste and concrete » American Society for testing and materials , pp .269-277, 1998.
- [71] **Ferraris** : « Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete :State of the Art Report » , Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 1999, vol 104, n°5, pp461-478.
- [72] **Ferraris, de Larrard** : « Testing and modeling of fresh concrete technology », NIST, 1998, février, NISTIR 6094, 61 pages.
- [73] **NIST** : « Comparison of concrete rheometers », International tests at LCPC (Nantes, France) in October 2000, 2001, Septembre, NIST 6819, 147 pages.
- [74] **François de Larrard** : « Formulation des bétons à hautes performances », BétonlabPro 3 Leçon n° 14, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées , Centre de Nantes
- [75] **J. Yammine** : « Bétons fluides à hautes performances : relation entre formulation, rhéologie et propriétés mécaniques » , Laboratoire de Mécanique et Technologie – Secteur Génie Civil et Environnement - Ecole Normale Supérieure de Cachan – 61 avenue du président Wilson – 94235 Cachan Cedex.
- [76] **T. Tahenni** : « Fissuration en béton avec référence particulière au béton à haute performance », mémoire de magister, USTHB, Algérie, Décembre 2006.
- [77] **Roux. N, Andrade. C, Sanjuan. M.A** : « Étude expérimentale sur la durabilité des bétons de poudres réactives », Annales de l'ITBTP, No. 532, Mars-Avril, Série béton 320, pp. 133-141,1995.
- [78] **J-P Ollivier, J-M Torrenti** : « La durabilité des bétons : La structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert », ENPC Paris, juin 2008.
- [79] **Université de Sherbrooke GCI 714** : « Chap 2 : Durabilité et réparations du béton ».
- [80] **Roziere Emmanuel** : « Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle», Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, Novembre 2007.
- [81] **Torrent R-J et Jornet A.**, « The quality of the concrete of low-medium and high-strength concretes », 1991, ACI SP-126, p. 1147-1161.
- [82] **Pann S., Tsong Y., Chao-Wei T. and Lin T.D** : « New Strength Model Based on Water-Cement Ratio and Capillary Porosity », Aci Materials Journal, Vol.100, No.4, July-August, 2003.
- [83] **Mentha P.K.** : « Durability of High-Strength Concrete », Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete, ACI SP 122, pp-19-28,1990.
- [84] **Pautre, Khayat, Langlois, Trudel, Cusson** : « Structural performance of some special concrete », Ffourth international symposium on the utilization of high strength/high performance concrete, Paris, Mai, p 787-796, 1999.
- [85] **Menou Abdellah** : « Étude du comportement thermomécanique des bétons à haute température : Approche multi echelles de l'endommagement thermique », Thèse de doctorat d'état, Université de Pau et des pays de l'Adour, Janvier 2004.

- [86] **Philippe Munoz** : « Rhéologie des bétons durcis : Approche couplée de la modélisation des retraits et fluages de bétons à hautes et très hautes performances », Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Toulouse, Janvier 2000.
- [87] **Le Roy R** : « Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances », Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA 22 , LCPC, Paris, 1996.
- [88] **Baroghel-Bouny V., Mounanga P., Khelidj A., Loukili A., Rafai N** : « Autogenous deformations of cement pastes: Part II – W/C effects, micro-macro correlations, and threshold values », Cement and Concrete Research, vol. 36, n° 1, p. 123-136, 2006.
- [89] **Pierre-Claude Aitcin** : « Le retrait endogène des bétons à hautes performances », Rapport d'activités, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Université de Sherbrooke- Université Laval, 1995-1998.
- [90] **R Morin, G Haddad, P-C Aitcin** : « Des structures en béton à haute performance sans fissures », Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), n° 238, pp 3-12, Mai-Juin 2002.
- [91] **Jianyong L., Yan Y.** : « A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete », Cement and Concrete Research, 31, pp. 1203–1206, 2001.
- [92] **J. Baron et J.P.Ollivier** : « La durabilité des bétons », Presses de l'ENPC, Paris, 453 pages, 1992.
- [93] **Baroghel-Bouny** : « Les spécificités des bétons à hautes performances : Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles », Etudes et recherches des LPC, Série Ouvrages d'art, OA 44 (LCPC, Paris, sept. 2004), 76 p .
- [94] **Behim M.** : « Sous produits industriels et Développement Durable : Réactivité, Rçole et durabilité des Laitiers d'El Hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire », Thèse doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba-Algérie, 2005.
- [95] **Michaël Dierkens** : « Principales agressions et attaques du béton », CETE de Lyon – DLL 15 novembre 2011
- [96] **Planète TP** : Tout sur les travaux publics « Optimisation de la formulation des BHP », ASCO-TP (Association pour la Connaissance des Travaux Publics), Paris, oct 2007.
- [97] **F. DE Larrard ; C. Puch** : « Formulation des bétons à hautes performances : la méthode des coulis », Bulletin de LCPC, n° 161, pp.75-83, mai-juin 1989.
- [98] **Mehta, P.K., and P.C. Aitcin** : « Principles Underlying the Production of High-Performance Concrete », Cement, Concrete and Aggregates Journal 12(2), 1990, pp. 70-78.
- [99] **Véronique Baroghel-Bouny** : « Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances », Thèse doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
- [100] **F . Tavakoli** : « La conception du pont de Joigny », les bétons à hautes performances, édité par Y. Malier , Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées , ISBN 2-85978-187-0 pp.471-481,1992.
- [101] **Y. Malier** : « L'utilisation du BHP dans une approche 'système' de la construction », les bétons à hautes performances, édité par Y. Malier , Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées , ISBN 2-85978-187-0 pp.3-21, 1992.

- [102] **G . Cadoret , P . Richard** : « Utilisation industrielle des bétons à hautes performances dans le bâtiment et les travaux publics », les bétons à hautes performances, édité par Y. Malier , Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées , ISBN 2-85978-187-0 pp.553-574, 1992.
- [103] **P.C. Aitcin** : « Le développement des bétons à hautes performances en Amérique du Nord », les bétons à hautes performances, édité par Y. Malier , Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées , ISBN 2-85978-187-0 pp.521-535, 1992.
- [104] **J.M. Brocherieux** : « Les bétons à hautes performances : les cas des tunnels », les bétons à hautes performances, édité par Y. Malier , Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées , ISBN 2-85978-187-0 pp.583-599, 1992.
- [105] **Bouchouika A, Ooudjit M.N, 2009** : « Influence du sable de dune finement broyé sur les propriétés physico-chimique et mécaniques des bétons », SBEIDO, ENSET Oran, 12-14 octobre, 2009.
- [106] **Bederina M, Makhloufi Z, Bounoua A, Bouziani T, Queneudec M, 2013** : « Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions », *Construction and Building Materials*, 2013;47:146–58.
- [107] **Kettab, R M, 2007** : « Contribution à la valorisation du sable de dunes », Thèse de doctorat, ENP, Algérie.
- [108] **AïtCin P C, 1992** : « L'emploi des fluidifiants dans les bétons à hautes performances », *Compte-rendu des travaux scientifiques du Projet national Voies nouvelles du matériau béton*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- [109] **Damen Z, 2005** : « Comportement physico-mécanique et résistance aux sulfates de mortier à base de ciments algériens », Mémoire de magistère, Université de Laghouat, Algérie, 105p.
- [110] **Makhloufi Z, Kadri E H, Bouhicha M, Benaïssa A, 2012** : « Resistance of limestone mortars with quaternary binders to sulfuric acid solution », *Construction and Building Materials*, volume 26, Issue 1, pp 497-504.
- [111] **Hekat E E, Khishar E, Mostafa H, 2002** : « Magnesium sulfate attack on hardened blended cements pastes under different circumstances », Faculty of science, Ain Chems, University Cairo, Egypt, pp1421-1427.
- [112] **Rozière E, Loukili A, El Hachem R, 2008** : « Indicateurs de performance de bétons exposés à la lixiviation et aux attaques sulfatiques externes », XXVI^e Rencontres universitaires de Génie Civil, Nancy, France, pp 1-8.
- [113] **Benosman A S, Mouli M, Taïbi H, Belbachir M, Senhadji Y, Bahlouli I, Houivet D, 2009** : « L'influence de l'ajout polymère sur la résistance des mortiers vis-à-vis d'une attaque chimique d'acide chlorhydrique », SBEIDO, ENSET Oran, 12-14 octobre, 2009.
- [114] **Goupy J, 2001** : « Introduction aux Plans d'expériences », Dunod. Paris. 303 pages.
- [115] **Goupy J, 2006** : « Les plans d'expériences », Revue MODULAD, 2006.
- [116] **Goupy J, 2000** : « Plans d'expériences : les mélanges », Dunod, Paris, 285 pages, ISBN 2 10 004218 1.
- [117] **Bederina M, Otteïcha M, Belhadj B, Dheily RM, Khenfer MM, Queneudec M, 2012** : « Drying shrinkage studies of wood sand concrete – effect of different wood treatments », *Construction and Building Materials*, 2012;36:1066–75.

- [118] **Guettala S, Mezghiche B** : « Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder », *Construction and Building Materials*, 2011;25(3):1263–9.
- [119] **Senhadji Y, Escadeillas G, Mouli M, Khelafi H, Benosman AS** : « Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar », *Powder Technol* 2014;254:314–23.
- [120] **Ilker Bekir Topcu, Ali Ugurlu** : « Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete », *Cement Concrete Res* 2003;33:1071-1075.
- [121] **Bederina M, Makhloufi Z, Bouziani T** : « Effect of limestone fillers the physic-mechanical properties of limestone concrete », *PhysProc* 2011;21:28–34.
- [122] **Alhozaimy A, Jaafar MS, Al-Negheimish A, Abdullah A, Taufiq-Yap YH, Noorzaei J, et al** : « Properties of high strength concrete using white and dune sands under normal and autoclaved curing », *Construction and Building Materials*, 2012;27(1):218–22.
- [123] **Rendell F., Jauberthie R., Cortes M. and Groutham M.**, « Deteriorated concrete – inspection and physic chemical analysis », Ed. Thomas Telford, London, 2002.
- [124] **Salhi M.**, « Etude des caractéristiques mécaniques d'un béton conservé dans l'eau de mer : Essais accélérés », mémoire de magister, Oran, ENSET, 2012.
- [125] **Ghomari M .L.**, « Effet du fluidifiant sur la durabilité des mortiers pouzzolaniques », mémoire de magister, Oran, USTMB, 2012.
- [126] **Skarapoulou A, Tsivilis S, Kakali G, Sharp J H, Swamy R N**, « Long term behavior of Portland Limestone cement mortars exposed to magnesium sulfate attack », *Cement & Concrete Composites* 31, 2009,628-636.
- [127] **Ollivier J. P & Vichot A**, « Durabilité des bétons », Presse de l'école Nationale Des Ponts et Chaussees, Paris, 2007.
- [128] **Arliguie G. & Hornain H.**, « Grandeurs associées à la durabilité des bétons », Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 2007.
- [129] **Pipilikaki P, and Katsioti M**, « Study of the hydration process of quaternary blended cements and durability of the produced mortars and concretes », *Construction and Building Materials*, vol. 23, n° 6, pp. 2246-2250, 2009.
- [130] **Hermann, Kurt**, « Substances chimiques exerçant une action sur le béton », Article Bulletin du ciment, 1995.
- [131] **Guettala S., Mezghiche B.**, « L'influence de l'ajout du sable de dune finement broyé au ciment, sur les performances mécaniques et de durabilité des pâtes », Séminaire International sur la Normalisation et Qualité dans la Construction, 18-19 Novembre, 128-138, Tlemcen, 2006.
- [132] **Guettala, S., Mezghiche, B. and Chebili, R.**, « Interest and effectiveness of the addition of the sand of dune finely crushed to cement, on the properties of the concrete », Sun light publishing CANADA, *World Journal of Engineering* 4 (1) 45-53, 2007.
- [133] **Lee S T, Moon H Y, Swamy R N**, « Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss », *Cement & Concrete Composites* 27, 2005, 65-76.
- [134] **Lee S T, Moon H Y, Hooton R D, Kim J P**, « Effect of solution concentrations and replacement levels of metakaolin on the resistance of mortars exposed to magnesium sulfate solutions », *Cement and Concrete Research* 35, 2005,1314–1323.

- [135] **Ganjian E, Pouya H S**, « Effect of magnesium and sulfate ions on durability of silica fume blended mixes exposed to seawater tidal zone », *Cement and Concrete Research* 35, 2005, 1332-1343.
- [136] **Skaropoulou A, Kakali G, Tsivilis S**, « Thaumassite form of sulfate attack in limestone cement concrete: The effect of cement composition, sand type and exposure temperature », *Construction and Building Materials* 36, 2012, 527-533.
- [137] **Jaubertie R**, « Dégradations de mortiers sous différents milieux sulfatiques » *Annales du bâtiment et des travaux publics* Septembre-Octobre (1999).
- [138] **Q. YU, K. Sawayama, S. Sugita, M. Shoya, Y Sojima**, « The reaction between rice husk ash and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution and the nature of its product », *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 37-43, 1999.
- [139] **Neville A**, « The confused world of sulfate attack on concrete », *Review, Cement and Concrete Research* 34, 1275-1296, 2004.
- [140] **A. M. Boddy, R. D. Hooton, M. D. A. Thomas**, « The effect of the silica content of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction », *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1263-1268, 2003.
- [141] **S. A. Hartshorn, J.H. Sharp, R.N. Swamy**, « The thaumasite form of sulphate attack in Portland limestone cement mortars stored in magnesium sulphate solution », *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, pp 351-359 (2002).
- [142] **Santhanama M, Cohen M D, Olek J**, « Mechanism of sulfate attack: a fresh look Part 2: Proposed mechanisms », *Cement and Concrete Research* 33, 2003, 341-346.
- [143] **Çavdar A, Yetgin S**, « Investigation of mechanical and mineralogical properties of mortars subjected to sulfate », *Construction and Building Materials* 24, 2010, 2331-22.
- [144] **Boubakeur T., Boulekbache B., Makhelouf A.**, « Influence du laitier sur les propriétés des ciments à base de calcaire », *Symposium International sur la construction en zone sismique, Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie)*, pp 1-8, 2010.
- [145] **Kazi A F., Maarouf H., Semcha A., Mekarta B.**, « Durabilité des mortiers à base de sédiments de dragage du port d'Oran », *Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Edition 2, Tanger, Maroc*, pp 195-198, 2011.
- [146] **Chihaoui R, 2008** : « Durabilité des matériaux cimentaires vis- à-vis d'un environnement chimiquement agressif », *Mémoire de magistère, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie*.
- [147] **Moundougou Idriss**, « Une étude de faisabilité pour une meilleure utilisation dans le matériau béton de granulats (potentiellement réactifs) vis-à-vis de la réaction alcali-silice », *Thèse de l'université de Lille*, 2010.
- [148] **Z. Makhloufi** : « Effet des additions minérales sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons calcaires dans les zones arides », *Thèse de doctorat, université Mohammed BOUDIAF (USTMB) d'Oran*, Octobre 2012.

RÉFÉRENCES NORMATIVES

- [ACI] **ACI comité** : « State of the art report on high strength concrete », *ACI 363-92.PP-53*, 1992.

- [**ACI 211-1**] **ACI 211. 1-91** : « Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete », American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1991.
- [**ACI 363**] **ACI 363** : « State of the art report on high strength concrete », Reported by committee 363, American Concrete Institute ACI, 1992.
- [**AFNOR**] **AFNOR, 2002** : « Béton et constituants des bétons, Tome1 : Spécification du béton et de ses constituants », 5ème édition, Recueil des Normes : Bâtiment et travaux publics, 2002.
- [**ASTM**] **ASTM** : « American Society for Testing and Materials ».
- [**ASTM C**] **ASTM C29** : « Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate », ASTM International, 4 pages, Jan-2003.
- [**NF EN 197-1**] **NF EN 197-1** : « Ciment- Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants (indice de classement P 15-101-1) » , Fév 2001.
- [**NF EN 1008**] **NF EN 1008** : « Eau de gâchage pour bétons Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (indice de classement P 18-211) », AFNOR ,Paris, Juillet 2003.
- [**NF P 15 433**] **NF P 15 433** : « Méthodes d'essais des ciments – Détermination du retrait et du gonflement », AFNOR, Paris, Février 1994.
- [**NF P 18 01**] **NF P 18-01** : « Classification des environnements agressifs », AFNOR ,Paris, Juin 1992.
- [**NF P 18 407**] **NF P 18-407** : « Bétons, essai de flexion ».
- [**NF P 18 451**] **NF P 18-451** : « Essai d'affaissement », AFNOR, Paris, Décembre 1981.